

直流系统可靠性故障树评估模型及应用

张静伟,任震,黄雯莹

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:直流系统可靠性评估已变得日益重要。利用故障树分析的相关理论,根据直流输电的基本原理,从引起直流系统故障的原因入手,建立了高压直流输电系统的故障树结构,所建立的故障树结构,考虑了引起系统失效的所有事件和换流站内元件存在备用的情况,是一种有效的可靠性评估算法。

关键词:直流输电系统;故障树;可靠性

中图分类号: TM 72; TM 732 **文献标识码:** A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0062-04

随着高压直流输电 HVDC(High Voltage Direct Current transmission)技术的不断发展和实际工程的日益增多,HVDC 系统的可靠性指标已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素。HVDC 系统可靠性评估日趋成熟,目前已经取得了很大的成果^[1~4]。文献^[5]还提出一种可靠性原始参数的求取方法。直流系统设备众多,用已有的这些方法很难考虑到所有的设备,若利用故障树分析法 FTA(Fault Tree Analysis),则可克服这一缺点。FTA 法实质上是事件之间的逻辑关系图,清晰地说明系统是怎样失效的。因此,利用 FTA 法分析 HVDC 系统的可靠性,就包括了所有可能引起系统故障的事件。

1 系统建模

1.1 FTA 法相关概念及其简介

完整的故障树 T 由一些底事件(basic event),通过逻辑门连到一个或多个顶端事件(top event),把系统最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标,把选定的系统故障状态称为顶端事件。基本实施步骤包括:

a. 定义系统和系统故障,确定系统故障事件,即“顶事件”;

b. 建造故障树;

c. 进行定性与定量分析。

故障树分析的关键是求解故障树的最小割集、最小路集、不交化最小割集或不交化最小路集,从而进行定性、定量的分析计算。给定的故障树 T ,由所有集合 $B_1, B_2, \dots, B_m$ 组成:

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

此处 $B_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}\}$ 是基本故障事件的集

合。仅当这些基本故障事件同时发生时,顶端事件才会发生,则称 B_i 为故障树的一个割集。如有这样一个割集,从其中任意移走一个元件后,就不再是割集,则称这个割集为最小割集。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^[6]。

若已求得故障树的所有最小割集 $C_1, C_2, \dots, C_m$, 式(1)可写为

$$T = \bigcup_{i=1}^m C_i \quad (2)$$

系统故障概率

$$P(T) = \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq m} P(C_i \cap C_j) + \dots + (-1)^{m-1} P(C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m)$$

若故障树结构比较复杂时,式(2)的项数很多,工程近似计算可只取 $\sum_{i=1}^m P(C_i)$,所得的结果称为系统故障概率的上界,若元件的故障概率越小,则上界与准确值的误差也越小^[7]。

1.2 可靠性参数的有关计算^[8]

a. 串联系统:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad \mu = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

式中 λ 为元件故障率; μ 为修复率; n 为串联的元件个数。

b. 并联系统:

$$\lambda = \left(\prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right) \sum_{i=1}^n \mu_i, \quad \mu = \sum_{i=1}^n \mu_i$$

式中 n 为并联元件个数。

1.3 可靠性指标

a. 平均无故障运行时间 MTBF(Mean Time Between Failure),以 t_{MTBF} 表示。

b. 平均故障持续时间 MDT(Mean Down Time); 以 t_{MDT} 表示。

c. 能量不可用率 UA(Unavailability),以 ε_{UA} 表示。

d. 能量可用率 A(Availability),以 ε_A 表示。
各指标计算如下:

$$t_{MTBF} = 1 / \lambda, t_{MDT} = 1 / \mu$$
$$\varepsilon_{UA} = \lambda / (\lambda + \mu), \varepsilon_A = 1 - \varepsilon_{UA}$$

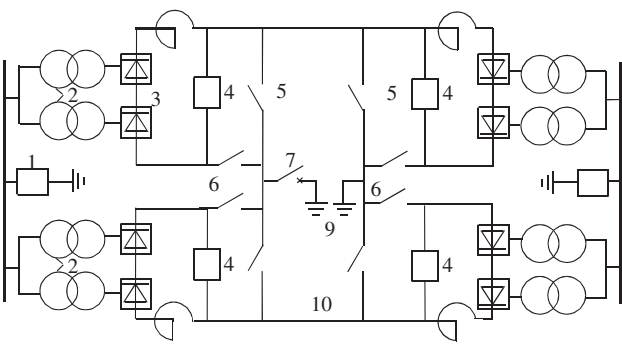
2 HVDC 故障树

2.1 HVDC 输电原理

以某直流系统双极运行为例,以大地作为直流回路,其结构示意图如 1 所示^[9]。

2.2 HVDC 故障树结构

HVDC 系统结构复杂,借助传统方法对 HVDC 系统的划分,从基本输电原理考虑,容易得到最终的故障树结构如图 2 所示^①。



1.交流滤波器组;2.换流变压器;3.换流桥;4.直流滤波器组;
5.金属回流电路开关;6.低压开关;7.金属回流电路断路器;
8.平波电抗器;9.接地电极;10.直流线路。

图 1 某直流系统主接线图

Fig.1 The wiring diagram of HVDC system

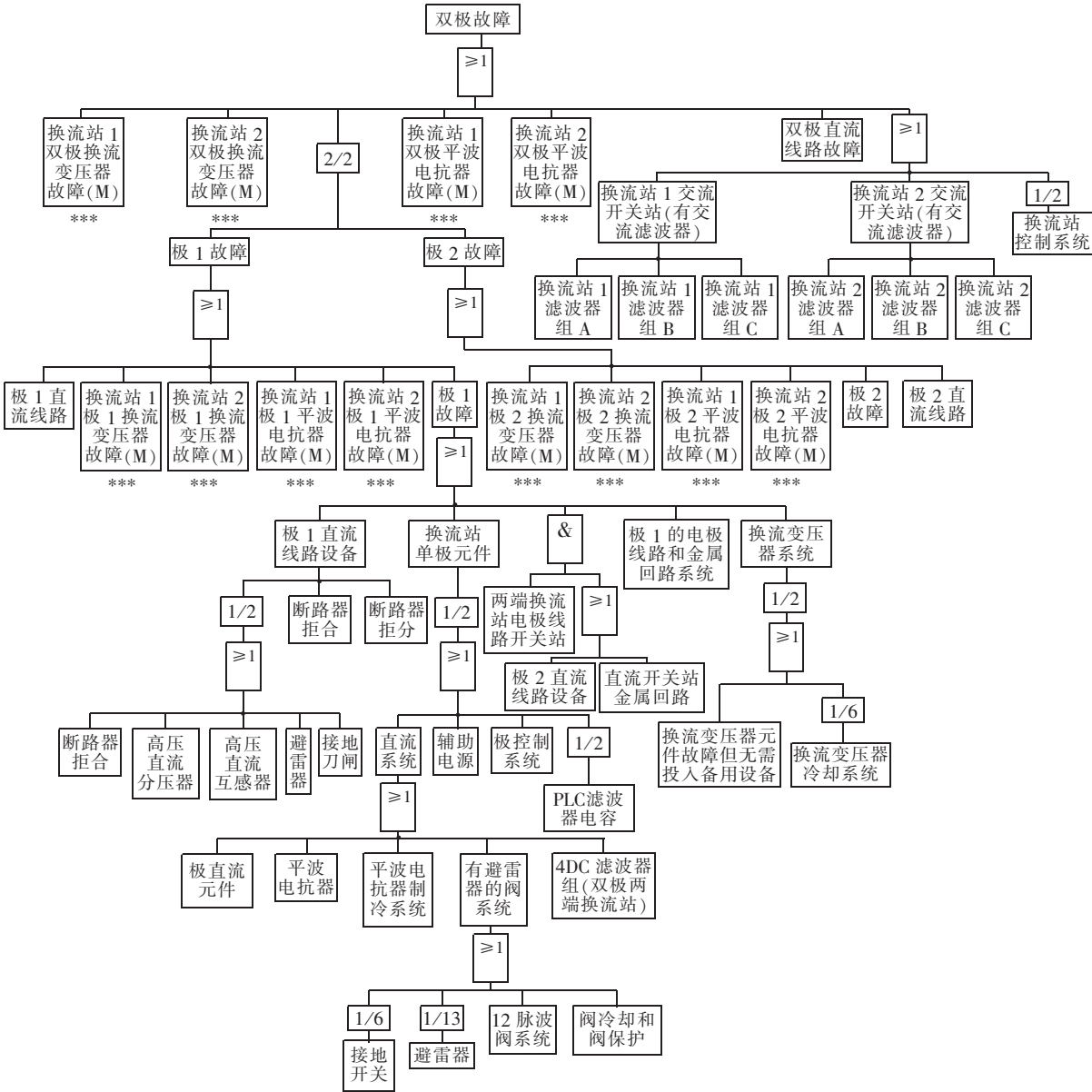


图 2 HVDC 系统故障树结构

Fig.2 The fault tree of HVDC system

① Guizhou-Guangdong + / - 500 kV DC Transmission Project, Appendix2 to study report availability and reliability. 2002,2.

故障树说明:1. “***”表示设备故障后由备用元件更换;2. 事件“极 2 故障”的结构同事件“极 1 故障”,限于篇幅没有给出;3. “ ≥ 1 ”表示只要输入事件中有一个失效则该事件失效;4. “ $\&$ ”表示输入事件全部失效时该事件才失效;5. “ m/n ”系统表示 n 个元件中有 m 个失效则该事件失效;6. “(M)”表示该子系统为一多状态系统,其故障率的求取需借助于状态空间图,计算方法见后;7. 所有基本事件均表示该设备或子系统故障;8. 极 1、极 2 同时故障才为双极故障。

故障树的顶事件是 HVDC 系统双极故障,引起该事件的原因是一些双极事件,比如直流线路双极失效事件,变压器和滤波器双极故障事件。对于单极而言,引起单极故障的事件主要为单极事件。换流站内对于一些重要的设备都设有备用元件,这种情况要借助于状态空间图求取,找出其中引起双极事件的累积状态,求出等效故障率。除了计算整个系统的可靠性指标外,还可根据实际需要求取各个子系统或者换流站的可靠性指标。

多状态系统只考虑对系统有影响的事件,其计

算方法如图 3 所示(以平波电抗器为例)。

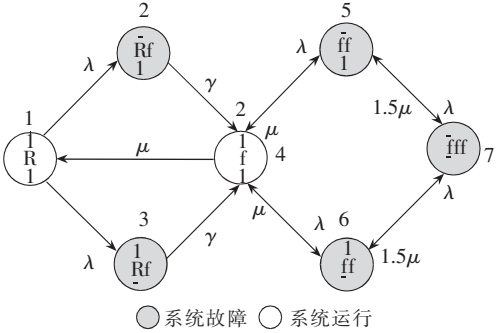


图 3 平波电抗器状态空间图

Fig.3 The state space diagram of smoothing reactor

图中每个状态中 R 表示设备处于备用状态, f 表示修理,上下两个数字表示每个换流站中完整的平波电抗器数目, γ 为安装率。利用文献[3]提出的边界墙的概念,把状态 1、4 合并为一个状态(正常状态),其余状态归为另一个状态(故障状态),求得等效故障率 $\Lambda = 2\lambda$, λ 为单个元件的故障率。可靠性指标计算见表 1(直流线路故障率推荐值 $0.44 \text{ 次}/(100\text{km}\cdot\text{a})^{\text{①}}$, μ 取 $1/228.095 \text{ 1/a}^{[10]}$)。

表 1 HVDC 可靠性指标

Tab.1 The reliability indices of HVDC system

极数	考虑直流线路			不计直流线路		
	ε_A	ε_{UA}	t_{MTBF}/h	ε_A	ε_{UA}	t_{MTBF}/h
极 1	0.995 645	4.355×10^{-3}	1 560.428	0.998 443	0.001 557	5 567.41
极 2	0.995 645	4.355×10^{-3}	1 560.428	0.998 443	0.001 557	5 567.41
双极	0.999 969 521	3.047×10^{-5}	113 795.570	0.999 997 02	2.981×10^{-6}	1.548×10^6

2.3 结果分析

a. 直流线路对于整个 HVDC 系统的可靠性指标有较大的影响,这是因为单位长度线路故障率较一般的设备大,而且输电距离远(直流输电适用于远距离高电压的输送),造成直流线路的故障率高。

b. 由图 2 可以看出,FTA 评估的方法包括了所有的直流系统元件。元件停运对系统的影响在图中也很清晰。

c. 传统的 HVDC 可靠性稳态评估方法,其可靠性参数的获取存在一定的困难,而且不能涉及到所有的直流系统设备。FTA 法从引起系统失效的原因出发,列出了所有可能引起系统失效的事件,故障树的计算也有专门的软件可以计算。从引起系统失效的事件考虑,还可计算每个子系统或设备对系统可靠性指标的影响大小,为系统的改进提供一些可靠性建议。因此,该方法是一种有效的方法。

参考文献:

[1] BILLINTON R,ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. Boston,USA: Pitman, 1984.
[2] 任 震,黄雯莹,冉 立. 高压直流输电系统可靠性评估 [M]. 北京:中国电力出版社,1996.
[3] 任 震,武 娟,陈立芳. 高压直流输电可靠性评估的等

效模型[J]. 电力系统自动化,1999,23(9):38-41.
REN Zhen,WU Juan,CHEN Li-fang. Equivalent model for HVDC reliability evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(9):38-41.
[4] 陈永进,任 震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术,2004,28(13):18-22.
CHEN Yong-jin,REN Zhen. Models combination and its application in reliability evaluation for HVDC system[J]. Power System Technology,2004,28(13):18-22.
[5] 任 震,万官泉,黄金凤,等. 电力系统可靠性原始参数的改进预测[J]. 电力系统自动化,2003,27(4):37-40.
REN Zhen,WAN Guan-quan,HUANG Jin-feng,et al. Prediction of original reliability parameter of power systems by an improved grey model[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(4):37-40.
[6] 韩小涛,尹项根,张 哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术,2004,28(1):56-59.
HAN Xiao-tao,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe. Application of fault tree analysis method in reliability analysis of substation communication system [J]. Power System Technology,2004,28(1):56-59.
[7] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,1983.
[8] 黄金凤. 基于 FD-Monte Carlo 混合法的大型交直流混合

① 天广直流输电工程交直流并联输电系统可靠性评估项目研究报告. 华南理工电力学院,中国南方电力联营公司,2001.

输电系统可靠性评估[D]. 广州:华南理工大学,2002.

HUANG Jin-feng.The reliability evaluation of bulk HVAC /HVDC hybrid transmission system based on FD-Monte Carlo methods[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2002.

[9] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京:水利电力出版社,1990.

[10] 湛 军. 大型电力系统可靠性评估的混合法[D]. 广州:华南理工大学,1999.

CHEN Jun.The reliability evaluation of bulk power system using comprehensive method[D]. Guangzhou:South China University of Technology,1999.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

张静伟(1981-),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性(E-mail:gxysmd@163.com);

任 震(1938-),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,国务院学位委员会电气工程学科组成员,IEEE 高级会员,主要研究方向为电力市场、电力系统规划与可靠性、高压直流输电及小波分析及其在电力系统中的应用(E-mail:epzhren@scut.edu.cn);

黄雯莹(1938-),女,浙江宁波人,教授,主要研究方向为可靠性数学、小波分析理论等。

F TA models and its application in HVDC system evaluation

ZHANG Jing-wei,REN Zhen,HUANG Wen-ying

(South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: The reliability evaluation of HVDC (High Voltage Direct Current transmission) system has become more important. A new way to calculate the reliability indices of HVDC system using FTA (Fault Tree Analysis) theory is given. The system fault tree is constructed based on the principle of HVDC and the reasons leading to system failure. It considers all system failure events and the spare components in station,and is an effective method.

This project is supported by National Natural Science Fund of China (50337010).

Key words: HVDC s ystem; fault tree; reliability