

高压直流换流站的相关失效模式探讨

陈碧云,任 震,雷秀仁

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 相关性是系统失效的普遍特征,是系统可靠性分析中不可避免的问题。对高压直流输电系统两端换流站内的主要相关失效模式进行了分类研究,以交流滤波器组、控制保护系统、换流阀系统、平波电抗器等具有代表性的系统为例,根据失效过程的不同特点,分别建立了串联系统、含重复事件的故障树、载荷-性能模型以及马尔柯夫过程等相适应的可靠性分析模型,并给出了相应的系统失效概率计算公式,为高压直流输电系统的可靠性评估提供了有效的模型基础和可行的分析方法。

关键词: 相关失效; 含重复事件的故障树; 载荷-性能干涉模型; 马尔柯夫过程

中图分类号: TM 732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)04-0021-04

0 引言

冗余及备用是工程中常用的 2 种提高系统可靠性的有效手段,但是由于系统失效相关性的存在,不但可能严重地影响冗余和备用的安全性,还使系统的失效行为及其部件的相互依赖关系变得十分复杂,给系统可靠性研究工作带来很大困难。

相关失效是指在同一时间或在规定时间段内,由于系统间或元件间在空间上、环境上、设计上以及人为因素所造成的失误等原因,而引起的 2 个或多个零件的失效或不可用状态。“相关”是系统失效的普遍特征,是系统可靠性分析中不可避免的问题,忽略系统各部分失效的相关性,在各部分失效相互独立的

假设条件下简单地进行系统可靠性分析与评价,可能会导致过大的误差,甚至得出错误的结论^[1]。从 20 世纪 70 年代到现在,可靠性研究人员先后提出了很多相关失效的模型及分析方法^[2-8]。其中,提出的模型有几十种之多,例如, β 因子模型、二项失效率(BFR)模型、共同载荷(CLM)模型、基本参数(BP)模型、多希腊字母(MGL)模型、 α 因子模型及载荷-性能模型等。主要的分析方法有两大类:组合型方法(非状态空间类)和马尔柯夫型方法(状态空间类)。可靠性块图、故障树、可靠性图表等均属于组合型方法;状态空间分析法、频率和持续时间法、随机 Petri 网络、Monte Carlo 模拟法等则属于马尔柯夫型方法。

文献[3]对多种相关失效模式及其分析方法进行比较后指出:同一种相关分析方法对于不同的相关失效模式具有不同的适应性。组合型方法用于求解共因失效 CCF(Common Cause Failure)问题较

收稿日期:2005-08-30
基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50337010)

之马尔柯夫类方法更为有效,而维修相关性问题的需用马尔柯夫类方法进行分析。

文中将针对高压直流输电系统两端换流站内存在的主要相关失效模式进行分类研究,分别提出相适应的模型和分析方法。

1 高压直流换流站的主要相关失效模式

高压直流换流站的设备包括交流和直流 2 部分,种类及数量繁多,各元件和子系统的物理连接关系及功能关系均十分复杂,因而设备之间的相关失效形式多样,根据失效的后果影响,可将其分为 3 类。

第 1 类是全相关失效。由于功能上或结构上的强相关性,系统中任一元件失效将导致整个系统失效,而只有当所有的元件均完好时系统才完好,这是相关性的一种常见的特例,该系统又称为全相关系统。如图 1 所示的一组双调谐交流滤波器,当滤波器组中的任一元件故障时,滤波器均无法实现其正常的滤波或无功支持功能,需使该组滤波器组退出运行后才能对故障元件进行维修,并当所有故障元件修复后滤波器组方可重新投入运行。因此,该滤波器组就是一个典型的全相关系统。

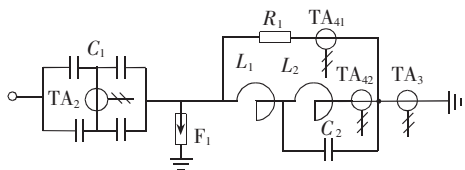


图 1 双调谐交流滤波器接线图

Fig.1 Single line diagram of double-tuned AC filter

第 2 类是共因失效 CCF。CCF 是相关失效问题中的最重要也最为复杂的一类失效形式,是指由于共同的原因而导致的 2 个或 2 个以上元件甚至整个系统同时失效的形式。根据 CCF 事件的起因,又可将其分为 3 种。

a. 由于共用元件而导致的 CCF。最常见的一种情况就是母线故障而引起的扩大性失效事件。母线故障时将导致连接其上的所有馈线或支路全部失效,造成扩大性的故障后果。

b. 由于共同的外部支撑条件故障而引起的 CCF。例如,多个元件或子系统采用相同的辅助电源、冷却系统或控制保护系统,当这些支撑系统故障时,将引起多个元件或子系统的同时失效。

c. 由于外部环境冲击而造成的 CCF。外部冲击事件通常包括元件载荷(电流或电压)异常突变、环境温度或湿度改变、突发的异常天气状况(如雷击、冰雹等)及自然或人为灾害事故(地震、火灾)等。

第 3 类是备用及维修的相关性。这是由于 2 个或 2 个以上的设备共享备用或维修人员而引起的相关性,这一类相关性虽然不影响各设备的失效率,但由于各设备的失效持续时间产生相互依赖性,从而影响系统的可靠性指标。由于现代 HVDC 系统常采用双极接线,一端换流站内的正负两极设备通常是对称

相同的,因而共享备用的情况比较常见,如两极上的平波电抗器、换流变压器等。

下文将以换流站内一些具有代表性的系统为例,对上述的几类相关失效问题进行分析。

2 全相关失效系统

全相关系统具有如下的特征:

a. 系统中的元件具有相同的备用模式;

b. 系统中任一元件故障对系统功能的影响是相同的,即任一元件失效时系统失效,当且仅当所有元件完好时系统才完好。

这一类系统功能性逻辑关系清晰,可以直接用串联系统或者故障树中的或门“OR”进行计算。以图 1 所示的双调谐滤波器组子系统为例,假设该系统共含 n 个元件,各元件的故障率为 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$,则系统的失效概率为

$$P_s = \sum_{i=1}^n q_i \quad (1)$$

3 母线的相关失效

在电力系统中,母线是最常见的会导致扩大性失效的元件之一。通常,母线的故障都将导致连接于其上的所有馈线分支同时失效。对于这一类 CCF 事件,可以很方便地应用含重复事件的故障树 FTRE (Fault Tree with Repeated Event) 求解。

以图 2 中某换流站的交流滤波器组为例,该滤波器系统由 3 组三调谐滤波器 $TT_1 \sim TT_3$, 4 组双调谐滤波器 $DT_1 \sim DT_4$ 以及 3 组并联电容器 $C_1 \sim C_3$ 组成,并分别接入到 3 段不同的馈线母线 $M_1 \sim M_3$ 上。滤波器系统是冗余系统,各类型滤波器组的冗余数均为 1。

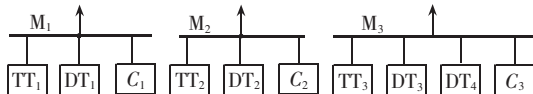


图 2 某换流站的交流滤波器组示意图

Fig.2 AC filter banks of a station

应用全相关系统模型,对母线及其相关元件(母线上所连的 TV、避雷器、接地刀等)和各组滤波器及其支路上的相关元件进行计算后,将母线处理成重复事件,得到子系统级的故障树如图 3 所示。

应用上行法可求出系统的最小割集。假设系统的最小割集为 $C=C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_l$,根据概率加法公式,得到系统的失效概率为

$$P_s = P\{C_1 \cup C_2 \dots \cup C_l\} = \sum_{i=1}^l P\{C_i\} - \sum_{i < j=2}^l P\{C_i \cap C_j\} + \dots + (-1)^{l-1} P\{C_i \cap C_j \dots \cap C_l\} \quad (2)$$

4 控制保护系统

交流系统的继电保护装置是通过断路器动作实现其功能的,因此通常将继电保护的影响计入断路器的模型中。而直流输电系统则通常采用分层的方式

入整个换流站系统故障树的相应分支上,则可进一步进行全系统的可靠性分析。

7 结语

本文以滤波器组、控制保护系统、阀系统及平波电抗器等换流站中的典型相关失效系统为例,根据各种相关失效模式的不同特点,分别提出了相适应的分析模型和方法,主要有:

- a. 用串联系统模拟全相关系统;
- b. 用含重复事件的故障树求解由于共享元件和外部支撑条件故障而引起的共因失效事件;
- c. 用载荷-性能模型模拟由于冲击环境引起的共因失效事件;
- d. 用马尔柯夫过程分析备用及维修的相关性事件。

本文所提的模型和方法为计及相关失效的高压直流系统的可靠性分析提供了有效的模型基础和可行的分析方法。

参考文献:

- [1] 谢里阳,林文强. 共因失效概率预测的离散化模型[J]. 核科学与工程,2002,22(6):186-192.
XIE Li-yang,LIN Wen-qiang. A discrete model for the prediction of common cause failure[J]. **Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering**,2002,22(6):186-192.
- [2] 李翠玲,谢里阳. 相关失效分析方法评述与探讨[J]. 机械设计与制造,2003(3):1-3.
LI Cui-ling,XIE Li-yang. Review and discussion of dependent failure analysis methods[J]. **Machinery Design & Manufacture**,2003(3):1-3.
- [3] MALHOTRA M,TRIVEDI K S. Power-hierarchy of depen-

dability - model types[J]. **IEEE Trans. on Reliability**,1994,43(3):493-502.

- [4] VAURIO J K. Common cause failure models,data,quantification[J]. **IEEE Trans. on Reliability**,1999,48(3):213-214.
- [5] HAUPTMANN U. The multi - class binomial failure rate model[J]. **Reliability Engineering and System Safety**,1996,53(1):85-90.
- [6] MANKAMO T,KOSONEN M. Dependent failure modeling in highly redundant structures-application to BWR safety valves[J]. **Reliability Engineering and System Safety**,1992,35(3):235-244.
- [7] KVAM P H. A parametric mixture - model for common cause failure data[J]. **IEEE Trans. on Reliability**,1998,47(1):30-34.
- [8] 谢里阳,林文强. 冗余系统共因失效的载荷-性能分析与概率估算[J]. 核科学与工程,2003,23(4):289-295.
XIE Li-yang,LIN Wen-qiang. Load-property interference based common cause failure mechanism analysis and probability estimation[J]. **Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering**,2003,23(4):289-295.
- [9] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

陈碧云(1978-),女,广西北海人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:cbybh@126.com);

任震(1938-),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,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、小波分析及其在电力系统中的应用;

雷秀仁(1964-),男,湖南常宁人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性与规划。

Discussion on dependent failure modes in HVDC commutation stations

CHEN Bi-yun,REN Zhen,LEI Xiu-ren

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

Abstract: Dependency is a universal characteristic of system failures,and also an inevitable problem in system reliability analysis. This main dependent failure modes in commutation stations of HVDC system are discussed. Using AC filter banks,control system, valve system and smoothing reactors as representative examples,suitable models are established according to different characteristics of these failure modes,such as series system model,fault tree with repeated events,load-property interference model and Markov process. Expressions of system failure rate probabilities are also given for each model. Models and analysis methods proposed in this paper provide an effective scheme of modeling and analysis for reliability evaluation of HVDC transmission systems.

This work is supported by the Key Project of the Natural Science Foundation of China (50337010).

Key words: dependent failure; fault tree with repeated events; load-property interference mode; Markov process