

FD法和故障树法在高压直流输电系统 可靠性评估中的比较分析

谢开贵, 夏天, 胡博, 曹侃

(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 400044)

摘要:详细比较了高压直流输电系统可靠性评估中常用的频率和持续时间(FD)法和故障树法,分别给出了各自的优缺点。在子系统划分的基础上分别建立各子系统的状态空间图和故障树图,并加以层层组合,得到整个直流输电系统的状态空间模型和故障树模型。分别采用FD法和故障树法对一单12脉接线高压直流输电系统进行了算例对比分析,计算的可靠性指标包括双极运行、单极停运、双极停运对应的概率、频率、平均持续时间等。

关键词:高压直流输电系统; FD法; 故障树法; 可靠性评估

Abstract: A detailed comparison of frequency and duration (FD) method and fault tree method in the reliability evaluation of HVDC transmission system is presented and the differences between these two methods are proposed. Based on the sub-system division, the state space diagram and fault tree diagram for individual components, sub-systems and the whole HVDC transmission system are established step by step. A HVDC transmission system of single 12-pulse is used as an example to demonstrate these two methods and the reliability indices for calculation includes the probability, the frequency, the duration and so on.

Key words: HVDC transmission system; frequency and duration (FD) method; fault tree method; reliability evaluation

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0001-04

0 引言

随着高压直流输电技术的不断发展和实际工程的日益增多,高压直流输电系统的可靠性已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素,其可靠性的改善也将给整个电力系统的安全、可靠和经济运行带来巨大的效益。因此准确评估高压直流输电系统的可靠性是一项十分重要的工作^[1]。

文献[2]作为可靠性评估的早期著作,将Markov理论和状态空间法引入电力系统可靠性评估;文献[3~6]将Markov理论和状态空间法应用于直流输电系统,建立了高压直流输电系统可靠性评估的状态空间模型;文献[7,8]采用结合确定性和概率性的混合方法进行高压直流输电系统可靠性评估;文献[9]以在交流系统可靠性评估中模拟直流输电系统三状态模型的方式建立起交直流系统可靠性评估的数学

模型;文献[10]利用故障树分析的相关理论,根据直流输电的基本原理,从引起直流输电系统故障的原因入手,建立了高压直流输电系统的故障树模型。上述文献都针对单一的计算方法进行研究,没有比较不同计算方法间的优劣,下面针对目前高压直流输电系统中常用的频率和持续时间(FD)法和故障树法,详细阐述两者的数学模型,在子系统划分的基础上分别建立各子系统的状态空间图和故障树,并加以层层组合,最终得到整个高压直流输电系统的可靠性模型,并采用算例进行了对比分析。

1 FD法可靠性评估模型

1.1 FD法概述

FD法着眼于建立系统各子系统的状态空间图并获得相应的等效模型,通过组合各等效模型进而建立整个高压直流输电系统的状态空间图。在建立状态空间图及对各子系统等效模型进行组合的过程中,可以考虑实际高压直流输电系统复杂的技术条件^[1~3]。

1.2 状态空间图

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A21);国家自然科学基金(50777067);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0762);重庆市自然科学基金重点项目(CSTS2008BC7031)

下面以桥子系统为例介绍高压直流输电系统各子系统的状态空间图和等效容量模型。

单个换流桥由 6 个晶闸管阀臂组成, 桥中阀臂所经历状态是工作—故障—修复—安装—工作。阀臂中通常设有晶闸管备用阀, 带 2 备用阀的单侧两极换流桥的状态空间图如图 1 所示, 其中 λ_v 、 μ_v 和 γ_v 分别为阀臂的故障率、修复率和安装率。图 1 中 b 和 S 分别表示 12 脉动阀组 (由 2 个换流桥构成) 正常运行和修复后等待安装 2 种状态。以图中状态 1 至 4 转移过程为例, 系统由 1.0 b0S 转移至 0.5 b0S 说明有一个 12 脉动阀组故障, 考虑到单侧两极有 2 个 12 脉阀组, 阀组中 2 个换流桥任一故障引起阀组故障, 换流桥中 6 个阀臂任一故障引起换流桥故障, 可以确定状态 1 至 4 的转移率为 $2 \times 2 \times 6 \lambda_v = 24 \lambda_v$ 。

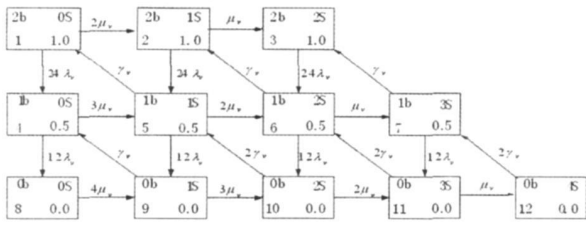


图 1 带 2 备用阀的单侧两极换流桥的状态空间图

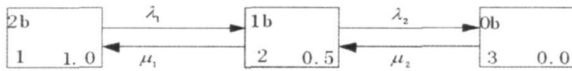


图 2 单侧两极换流桥等效模型

对于每一种备用情况, 均可通过 FD 法结合容量归并求出单侧两极换流桥的等效模型, 如图 2 所示。图中的 1.0、0.5、0.0 状态分别对应单侧桥子系统的 100% 容量、50% 容量和 0% 容量状态。

用类似的方法, 可获得换流变压器子系统多容量状态等效模型, 控制保护子系统多容量状态等效模型以及极设备和交流滤波器子系统多容量状态等效模型。

将各子系统的等效模型逐次地组合, 即可获得整个高压直流输电系统的状态空间图。由于其每个子系统均需建立状态空间图, 其增加求解等效模型个数, 但其降低了每次求解模型的阶数。限于篇幅这里只画出了桥子系统的状态空间图和等效容量模型。

1.3 FD 法数学模型^[1~3]

下面以图 2 求取系统可靠性指标为例介绍 FD 法的数学模型。根据图 2 状态空间图写出转移率矩阵 A 从而得到线性方程组。

$$\begin{cases} (P_0, P_1, \dots, P_N)A = 0 \\ \sum_{i=0}^N P_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, P_i 表示在稳态运行下组合系统处于状态 i 的概率。显然, 有线性方程组 (1) 可求出每个状态的概率。

由式 (2) 和式 (3) 计算各状态或累积状态的频率、平均持续时间。

$$f_i = \sum_{j \in I} \sum_{k \in I} f_{ij} = \sum_{j \in I} P_j \sum_{k \in I} a_{kj} \quad (2)$$

式 (2) 中, I 为由某几个具有相同容量水平的单独状态所组成的某个累积状态; 频率 f_i 是指单位时间从累积状态 I 向外转移频率; f_{ij} 为状态 i 到状态 j 的转移频率; a_{ij} 为转移率矩阵 A 中相应的元素。累积状态 I 的平均持续时间 T_i 为

$$T_i = \frac{\sum_{j \in I} P_j}{f_i} \quad (3)$$

至此利用 FD 法, 得到了高压直流输电系统各容量状态下的稳态概率、频率和平均持续时间, 下面计算系统可靠性指标。总等值停运时间 TEOT 为

$$TEOT = \sum EOT = \text{实际停运时间} \times \left(1 - \frac{\text{停运期间可用容量}}{\text{额定容量}}\right) \quad (4)$$

式 (4) 中的 EOT 为各容量状态的等值停运时间。能量不可用率 EU 为

$$EU = TEOT \text{ 研究的时段} \quad (5)$$

其他可靠性指标包括单极强迫停运次数 MUOT 和双极强迫停运次数 BUOT 等。

2 故障树法可靠性评估模型

2.1 故障树法概述

故障树分析法是一种使用图形演绎逻辑推理方法, 用图说明系统的失效原因, 把系统的故障与组成系统的部件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。但是在分析复杂系统时, 由于逻辑关系复杂, 故障树分析法的计算量较大, 离不开计算机化和软件化^[1,2,11]。

2.2 故障树图

故障树的构造过程, 是寻找系统故障和导致系统

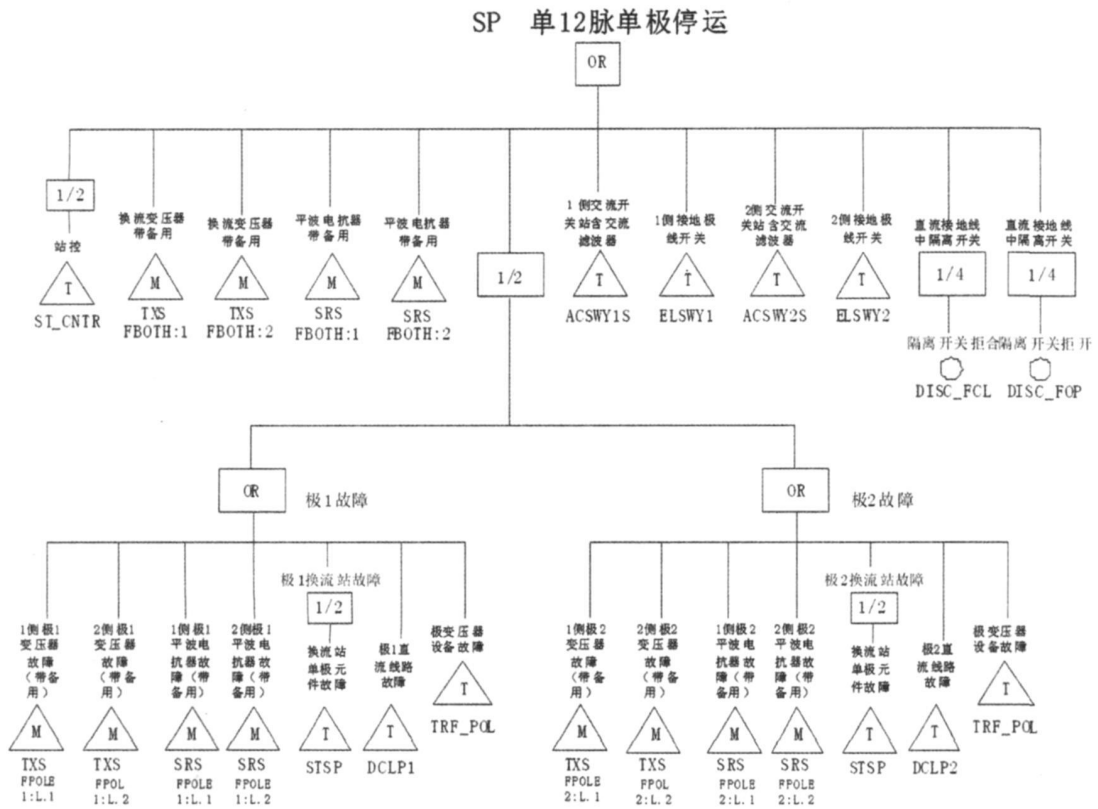


图 3 单极停运的故障树图

故障的诸因素之间逻辑关系的过程,并且用故障树的图形符号(事件符号与逻辑符号),抽象表示实际系统故障组合和传递的逻辑关系。

根据直流输电系统各元件间故障的逻辑关系,建立各子系统的故障树图,从底事件开始层层组合最终得到整个高压直流输电系统可靠性指标。限于篇幅,这里只给出高压直流输电系统单 12 脉接线引起单极停运的故障树图,如图 3 所示。

2.3 故障树法数学模型^[1,2,10]

在进行故障树定量计算时,一般要作以下几个假设:

- ①底事件之间相互独立;
- ②底事件和顶事件只考虑 2 种状态,即正常或故障 2 种状态;
- ③采用最小割集求顶事件发生的概率。

设故障树有 k 个最小割集 $K_i (1 \leq i \leq k)$, 故障树的结构函数表示为

$$T = \Phi(X) = K_1 + K_2 + \dots + K_k \quad (6)$$

其中,每个最小割集 $K_i (1 \leq i \leq k)$ 是底事件 $x_j (1 \leq j \leq n, n$ 为底事件数目) 的积事件。

一般情况下,最小割集彼此相交,根据相容事件的概率计算公式,顶事件发生概率为 $P(T)$ (系统不可靠度为 F_s) 为:

$$\begin{aligned} F_s &= P(T) = P(K_1 + K_2 + \dots + K_k) \\ &= \sum_{i=1}^k P(K_i) - \sum_{i < j=2}^k P(K_i K_j) + \\ &\quad \sum_{i < j < k=3}^k P(K_i K_j K_k) + \dots \\ &\quad + (-1)^{k-1} P(K_1 K_2 \dots K_k) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 具有 $(2^k - 1)$ 个项,当最小割集数目 k 达到一定程度时,会产生组合爆炸问题。

3 算例分析

分别采用 FD 法和故障树法对单 12 脉接线高压直流输电系统进行可靠性评估,系统接线图如图 4 所示,在进行可靠性评估时,采用的原始参数主要来源于贵广 I 超高压直流输电系统,各元件的可靠性参数如表 1 所示。表 2 分别列出了这 2 种方法的计算结果,主要包括双极运行、单极停运、双极停运对应的概率、频率、平均持续时间、总持续时间、总等值停运时间、能量可用率、能量不可用率。

从表 2 中可以看出这 2 种方法的计算结果基本一致,部分可靠性指标有一定差别,主要是由于故障树法不能考虑系统各状态间的随机转移情况以及由此引起的影响,与 FD 法相比必然会带来误差。

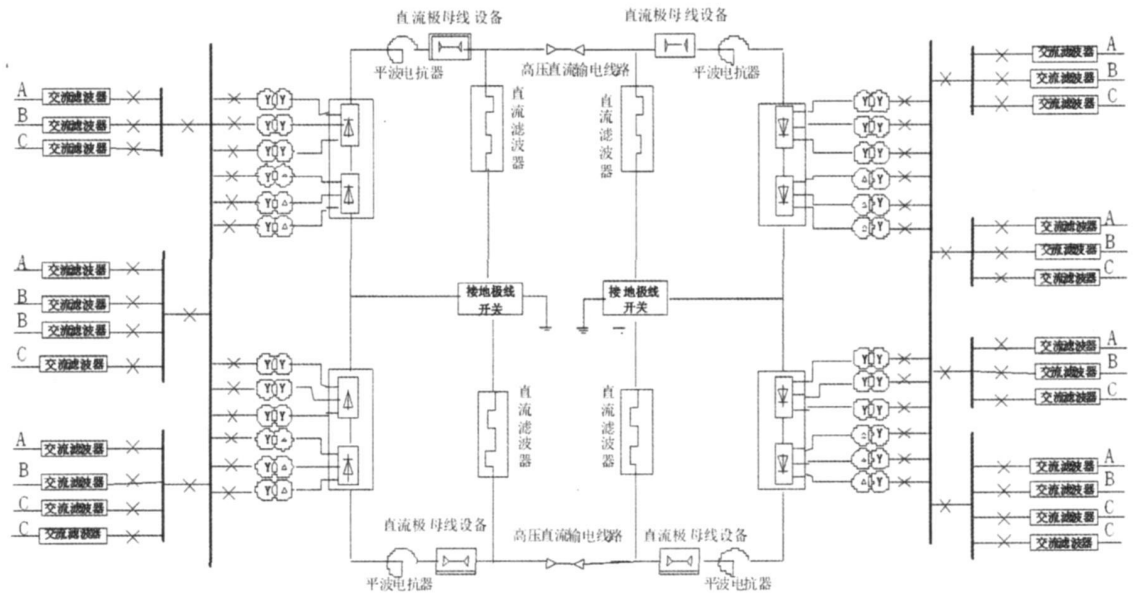


图 4 单 12 接线 HVDC 系统示意图

表 1 直流输电系统主要元件可靠性原始参数

组合元件	故障率 (次/a)	修复率 (次/a)	安装时间 (h)
阀臂	0.137 4	1 460.000 0	6
换流变压器	0.012 6	290.500 8	48
极设备	0.005 6	761.068 7	
控制保护	0.088 0(阀控) 0.010 0(站控)	1 158 120 0(阀控) 1 179 030 0(站控)	—
交流滤波器	0.200 0	876.000 0	

表 2 单 12 脉接线直流输电系统可靠性计算结果

基本指标 (FD法)	双极运行	单极停运	双极停运
发生概率	0.996 710 25	0.003 279	0.000 010 533
发生频率 (次/a)	3.959 619 093	3.944 808 85	0.038 545 26
平均持续时间 (h)	2 205.056	7.282	2.394
总持续时间 (h)	8 721.728 2	28.802 7	9.469 06
基本指标 (FD法)	双极运行	单极停运	双极停运
发生概率	0.996 772 00	0.003 212	0.000 003 096
发生频率 (次/a)	3.329 938 00	3.295 8	0.03 413 8
平均持续时间 (h)	2 622.187	8.537	4.106
总持续时间 (h)	8 717.965 9	28.382 9	13.6512
系统总指标	总等值停运时间 (h/a)	能量可用率 EA	能量不可用率 EU
FD法	14.455 3	99.834 9%	0.165 00%
故障树法	14.208 3	99.839 1%	0.160 90%

4 结 论

由于高压直流输电系统传输容量大、元件多、结构复杂、故障率高且运算条件复杂，将使故障树分析法的计算量变得十分巨大，由于不能考虑系统在各种状态之间的随机转移情况以及由此而引起的影响，因此，计算结果必然会带来误差。同时，使用该方法建立故障树是一项十分繁琐的工作。此外，该方法的实现对图形化、微机化等计算机软件方面有较高的要求，必然加大了算法实现的难度和经济成本，不及 FD 法来得有效方便。

对 FD 法而言，由于直流输电系统本身较复杂，状态空间维数较多，虽然可以通过建立直流输电系统各子系统及整个系统的等效模型来降低维数，但状态空间图的绘制仍然较为繁琐并且很容易出错，通用性也有待进一步提高。

因此，可以看出这 2 种方法都存在各自的优缺点，如何找到一种可靠有效的计算方法也是当前高压直流输电系统可靠性评估方法研究的重点。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Engineering Systems [M]. New York: Plenum Press 1992.

(下转第 38 页)

可以清楚地看到,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 比采用固定串补的情况下明显地减小,并使其振荡波形趋于平缓,这说明系统采用了 SMES 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制。而且可以同时得到输电线路相电压的标幺值,如图 6 所示。

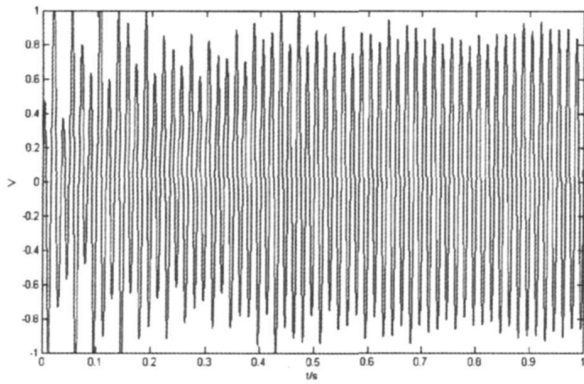


图 6 系统 A 相电压 (P.U)

5 结 论

通过以上算例的仿真分析,可以看出采用 SMES 方案进行电力系统的无功补偿,既可以稳定电力系统的电压,提高电压的峰值,而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用,阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题,SEMS 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述,应用 SEMS 方案,进行电力系统的无功补偿以及次同步谐振的阻尼具有极高的经济实用价值。

参考文献

- [1] 钟胜. 与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26-29.
- [2] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 何大愚. 柔性交流输电的定义、机遇及局限性 [J]. 电网技术, 1996, (20): 18-24.
- [4] 曹路, 陈衍. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25-30.
- [5] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 张文涛. 次同步谐振问题及防止措施 [J]. 电网技术, 1989, (2): 59-65.
- [7] IEEE Committee Report. Countermeasures to Sub-synchronous Resonance Problems, IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1810-1817.
- [8] R. G. Farmer, A. L. Svchwalb. E. kvate Navajo project report on Sub-synchronous Resonance Analysis and Solutions. IEEE Trans on PAS, 1977. 1266-1232
- [9] R. F. Wolff. Stop Sub-synchronous T/G-Shaft Damage, Electrical World, 1981, 129-133.
- [10] 李岩松. 基于同意潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究 [M]. 北京: 华北电力大学, 2000.
- [11] Xing K, Kusic G. L. Damping subsynchronous resonance by phase shifters. IEEE Tran on Energy Conversion, 1989, 4(3): 344-350.

作者简介:

秦浩庭 (1981-), 男, 西南交通大学在读硕士。

(收稿日期: 2009-05-15)

(上接第 4 页)

- [3] 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.
- [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.
- [5] Kunuganty S. HVDC Transmission System Models for Power System Reliability Evaluation [C]. IEEE WESCANEX '95 Conference proceedings Wescanex 1995, 5: 501-507.
- [6] Billinton R, Aboreshaid S. A Hybrid Deterministic/Probabilistic Technique for HVDC System Reliability Evaluation [A]. 1997 Conference on Communications Power and Computing [C]. WESCANEXPII Proceedings Winnipeg MB, 1997, 5: 35-40.
- [7] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability

Evaluation of Hybrid Multi-terminal HVDC Substation Systems [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571-577.

- [8] 刘海涛, 程林, 孙元章. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31.
- [9] 张静伟, 任震, 黄雯莹. 直流输电系统可靠性故障树评估模型及应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 25(6): 62-65.
- [10] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值计算方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

作者简介:

谢开贵 (1972-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统并行计算及电力市场等方向的研究和教学工作。

(收稿日期: 2009-07-09)