

# 基于 FD 法和模型组合的柔性直流输电可靠性评估

丁明, 毕锐, 王京景

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 建立柔性直流输电系统的可靠性模型, 为柔性直流输电系统的可靠性评估提供理论基础和方法。根据 Markov 过程的基本原理和累积状态间转移频率性质, 在对基于电压源型换流器的柔性直流输电系统的构成以及故障方式研究的基础上, 通过对系统进行划分, 建立各子系统的数学模型。然后使用模型组合的方法, 在子系统模型的基础上, 组合建立整个柔性直流输电系统的数学模型。该方法有效地降低了采用状态穷举法时计算的复杂度, 减小了求解维数并且加快了求解速度。通过一个算例和 ABB 公司的统计数据比较, 说明该方法可以有效地应用于柔性直流输电的可靠性评估中, 对柔性直流输电工程有一定的指导意义。

**关键词:** 柔性直流输电; 可靠性; FD 法; 模型组合

## FD method and combined model for reliability assessment of HVDC flexible

DING Ming, BI Rui, WANG Jing-jing

(School of Electrical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to offer a theoretical foundation and method, this paper presents the reliability assessment model of HVDC flexible. The subsystem mathematic models of HVDC flexible are established based on the basic principle of Markov processes and the properties of transitional frequencies among cumulative states, which considers not only the HVDC flexible construct, but also the fault mode in HVDC flexible system. Then based on subsystem models, the combined equivalent reliability model of HVDC flexible is discussed in detail. This algorithm can effectively decrease the complexity of calculating compared with the method of state enumeration, reduce the dimension and speed up the calculating process. At last, compared with the statistical data of ABB, an example indicates that this method is very feasible and reasonable, which will provide the valuable reference for HVDC flexible project.

**Key words:** HVDC Flexible; reliability; FD method; combined model

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0033-05

## 0 引言

HVDC 由于其远距离电能传输和异步系统互联方面的优势, 目前在全球总的输送容量已经达到 60 GW, 不同方案的输送容量从 50 MW 到 6300 MW 不等。目前国外绝大部分、国内全部已经投入运行的 HVDC 项目, 是采用电网换流型器件(晶闸管)构成的电流源型换流器。而近些年来, 在 HVDC 输电领域出现了采用自换流型电力电子器件的电压源型换流器。国内将采用电压源型换流器构成的 HVDC 系统称为柔性直流输电系统。柔性直流输电系统是电力电子技术在电力系统中一项新的应用<sup>[1~3]</sup>, 它能够独

立地控制有功和无功的潮流, 这使得其可以用于连接弱交流系统, 甚至可以连接无源的交流网络, 而这是采用电流型换流器的 HVDC 系统所不具备的。

从全球范围来看, 从 1997 年 Gotland 的首次示范工程至今, 国内外采用柔性直流输电系统的工程实例并不是很多。我国到目前为止还未有一项实际运行的实例, 大多处于初步研究阶段, 因此有必要对柔性直流输电系统的可靠性水平进行定量地评估, 确定合适的可用率水平, 找到影响可靠性指标的薄弱环节, 从而为我国柔性直流输电工程的开展提供有意义的指导。

目前, 针对柔性直流输电系统可靠性分析所进行的工作主要集中在几个大型跨国公司的试验室内, 开展的主要是可靠性物理方面的研究。由于柔

基金项目: 国家电网科技资助项目 SQKJ[2007]106

性直流输电系统在电力系统中实际运行数据的缺乏,关于柔性直流输电系统的概率可靠性模型的讨论较少。因此就其评估方法而言,尚未有进行深入的研究。在建立柔性直流输电系统可靠性评估方法的过程中,要充分借鉴在高压直流输电可靠性评估中成熟的方法,同时也要充分考虑到柔性直流输电系统自身特点,合理地建立系统模型。在高压直流输电系统可靠性评估的理论成果主要有<sup>[1,5]</sup>: Billinton R.等人提出的频率和持续时间法(FD法); Oliveira G.C等人提出的 Monte Carlo 模拟法;在国内任震等发展和提出了将 Monte Carlo 模拟法和解析法相结合的混合法。这些方法对柔性直流输电系统可靠性指标的计算提供了一些有益的思路。因此,本文研究的目的是通过对柔性直流输电系统进行研究,在已有的高压直流输电可靠性评估方法的基础上,寻求一种适合柔性直流输电系统的可靠性评估等效模型,并对其进行可靠性评估,为柔性直流输电工程的开展提供理论基础和评价方法。

### 1 系统构成及故障分析<sup>[1,6]</sup>

柔性直流输电系统核心单元是采用自换流型的电力电子器件构成电压源型换流器。图1给出了柔性直流输电系统模块化的单侧电路图,包括直流线路、储能直流电容、电压源型换流器、交流电抗器、换流变压器和交流滤波器等。

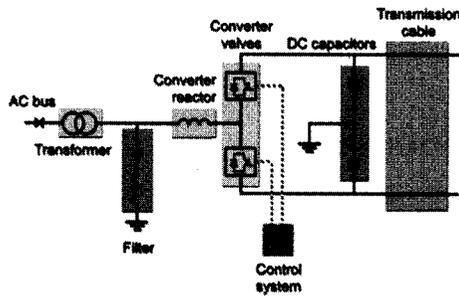


图1 柔性直流输电系统结构图

Fig.1 The structure diagram of HVDC flexible system.

传统的 HVDC 系统中的统计内容通常可以按照系统的组成进行划分统计。一般可以根据子系统对整个 HVDC 系统输送容量的影响,将 HVDC 的停运按三种类别进行统计:

- 1) 阀组子系统 主要指换流变压器、阀组、阀控等元件的各种故障或计划停运。
- 2) 极子系统 主要指换流变压器、平波电抗器、交流滤波器、极控装置、单极输电线路等引起极停运的各种设备故障或计划停运。

3) 双极子系统 主要指由主站控系统、接地极、无功补偿装置组成的极站和双极输电线路等引起双极停运的各种设备故障或计划停运。

在已经运行柔性直流输电工程中,考虑到对环境的影响以及传输容量的问题,柔性直流输电系统都无一例外的采用了双极两线制结构,由于并未采用大地或者海水作为回路,所以对于柔性直流输电系统,不存在单极运行的情况。当其关键组成元件故障后,系统容量在 0 容量和 100%容量之间进行变换(未考虑由于调节影响所造成的降额运行状态)。在进行子系统划分时,不考虑以大地或海水为回路单极运行。所以从可靠性角度而言,柔性直流输电系统可以用一个串联结构进行建模。串联系统中的任何一个环节出现问题,都将影响到系统的运行。按照系统可靠性角度的串联连接,同时参考传统直流输电的分类方法,可以将其划分成如下的组成单元:

- 1) 阀组子系统 主要指阀组、阀控、阀冷却装置、保护控制装置、直流储能电容等元件的各种故障或计划停运。
- 2) 直流侧设备 主要有直流电容、直流电缆等元件的各种故障或计划停运。
- 3) 交流开关站 主要包括断路器、接地开关、交流侧电抗器、交流滤波器等元件的各种故障或计划停运。
- 4) 换流变压器。

在实际进行数据统计时,即可以按照上面分组进行。实际可靠性评估计算中可以根据统计的数据量的多寡,对上述各分组进行详尽或者粗略的处理。其中对阀组单元而言,由于电压源型换流器相对于电流源型换流器,具有产生的谐波大为减弱、不会出现换相失败故障等优点,故障率大大降低。采用模块化的设计安装方式,在运行维护方面可以采用替换维护的方式,最大程度上减少停运时间。所以较之前一些文章<sup>[5]</sup>中将阀组作为一个整体进行建模更具合理性。

### 2 柔性直流输电系统的可靠性模型

柔性直流输电系统是由多元件构成的一个复杂系统。从直观的角度看,在任一时刻,系统的状态(停运或者运行)实际上是由组成元件的状态所决定的。当采用 FD 法进行处理时,如果直接根据各个元件的状态进行状态穷举的话,假设各元件有两种状态(停运或者运行),系统由  $N$  个元件(单元)构成,那么系统的可能状态就有  $2^N$  个<sup>[4]</sup>。如果直接对系统各个状态进行求解,计算量随着元件个数  $N$

而呈指数倍地增长, 在实际中是不可行的。因此在进行可靠性分析时, 并未采用状态枚举的方法, 而是通过将系统中各单元分别建模, 采用模型组合的方法降低计算的复杂度, 然后与 FD 法相结合, 计算出系统的可靠性稳态指标。具体的过程如下: 首先将系统按其功能进行单元划分, 其次建立各单元的强迫停运模型, 然后建立单元的两状态强迫停运模型。采用模型组合的方式, 求出系统等效两状态强迫停运模型。最后根据系统等效两状态强迫停运模型, 求出柔性直流输电系统的稳态可靠性指标。

### 2.1 单元强迫停运模型

由于柔性直流输电系统中各组成部分都可以采用模块化的设计方式, 一方面可以方便安装调试。各单元在厂家调试完毕后, 在工作现场进行组装即可。另一方面模块化的设计, 可以使某一单元模块发生故障后, 可用通过备用元件的直接更换, 减少故障引起的系统停运时间。因此考虑各单元模块的强迫停运模型时, 是按照三状态的模型进行建立的; 而为了计算方便起见, 在不同备用水平下又分别计算出各单元的等效两状态强迫停运模型。

当不考虑备用时, 单元模型可以通过稳态的“运行-停运-修复-安装-运行”的随机过程来模拟, 图 2 给出了某单元三状态强迫停运模型的状态空间<sup>[5, 7]</sup>。

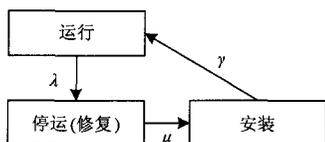


图 2 三状态强迫停运模型状态空间图

Fig.2 State space diagram of three-state forced equivalent model

图中,  $\lambda$  为失效率 (失效次数/年);  $\mu$  为修复率 (修复次数/年),  $r$  为安装率 (安装次数/年)。

如果元件备用数足够多而无需考虑修复时间, 或修复时间较长而安装时间可以忽略不计的情况下, 图 2 也可以转换成两状态模型<sup>[8]</sup>, 图 3 给出了不考虑安装时间的两状态等效模型。在实际运用中可以根据需要而采用三状态或两状态的强迫停运模型。

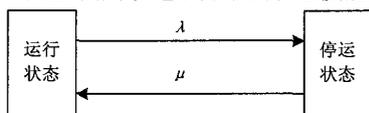


图 3 可修复元件简化状态空间图

Fig.3 State space diagram of the repairable element

图 3 模型的稳态不可用率  $U$  可由式 (1) 表示

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} = \frac{f \times MTTR}{8760} \quad (1)$$

式中;  $MTTR$  为平均修复时间 (h);  $MTTF$  为平均运行时间 (h);  $f$  为平均失效率 (失效次数/年)。

### 2.2 两电平拓扑结构换流桥的等效模型

柔性直流输电系统的单元模块划分在前节中已经有所叙述, 下面详细介绍采用两电平拓扑结构的换流桥等效模型的建立方法, 其它单元模块的处理方法与此相同。换流桥是柔性直流输电系统的重要组成部分。目前在柔性直流输电系统主电路拓扑结构研究中讨论最多的是两电平和二极管钳位的三电平结构。下面给出两电平结构换流桥的状态空间图 (见图 4)。至于三电平结构, 由于结构不同所以状态空间图有所不同, 但有相同建立方法。

图 4 中的两电平结构的换流桥由 6 个 IGBT 阀臂组成, 桥正常工作的条件是 6 个阀臂都处于正常状态。状态空间图中 1b 表示换流桥处在正常工作状态; 0b 表示换流桥处在停运状态。ns 表示有  $n$  个阀处在备用状态。1、2 等表示换流桥处于不同的状态。0.0 和 1.0 分别表示系统容量 0% 和 100%。故障率  $\lambda$ 、修复率  $\mu$ 、安装率  $\gamma$  是指换流器中各阀臂的可靠性数据。

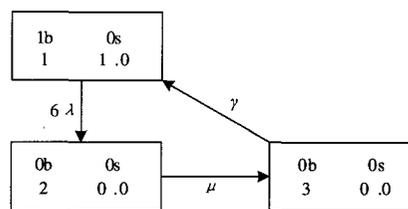


图 4 不带备用阀时一侧换流桥的状态空间图

Fig. 4 State space diagram of converter bridge with no sapre

根据状态空间图 4 可以建立无备用情况下, 一侧换流桥随机转移概率矩阵  $A$ <sup>[7]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} -6\lambda & 6\lambda & 0 \\ 0 & -\mu & \mu \\ \gamma & 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} (p_0, p_1, \dots, p_N) A = 0 \\ \sum_{i=0}^N P_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2) 可以计算得出图 4 中处于各状态的概率  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。进而将状态 2、3 合并。得到如图 5 所示的一侧桥等效模型。

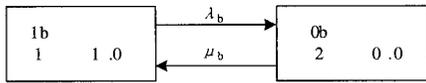


图 5 一侧换流桥的等效模型

Fig. 5 Equivalent mode of converter bridge

等效故障率和等效修复率分别为:

$$\lambda_b = (f_{1-2})/P_1 = P_1 \times 6\lambda / P_1 = 6\lambda$$

$$\mu_b = (f_{2-1})/P_2 = P_3 \times \gamma / (P_2 + P_3)$$

当系统采用不同备用时, 其状态空间图有所不同, 图 6、图 7 给出了 1 备用和 2 备用时, 换流桥的状态空间图。具体的等效计算过程同前。

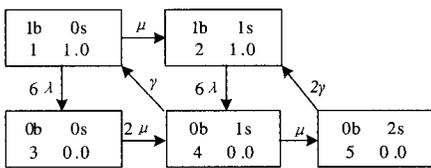


图 6 带一个备用阀时一侧换流桥的状态空间图

Fig.6 State space diagram of converter bridge with one spare valve

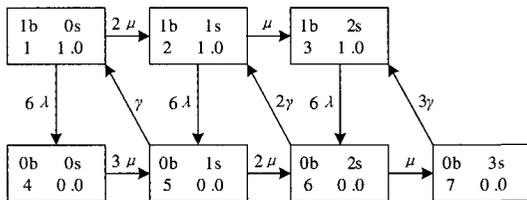


图 7 带两个备用阀时一侧换流桥的状态空间图

Fig. 7 State space diagram of converter bridge with two spare valve

### 2.3 系统的模型组合

根据 1 节中对柔性直流输电系统地划分, 同时考虑到实际运行条件, 在建立系统模型时仅考虑到关键元件对系统可靠性的影响。可以认为系统的可靠性水平是由直流电缆、直流储能电容、换流桥、交流电抗器、换流变压器、以及换流桥的冷却装置及控制保护单元的可靠性条件所决定。因此在建立各单元等效模型的基础上, 通过模型组合的方法建立图 8 所示系统等效模型, 进一步进行模型化简可以得到与图 5 类似的两状态系统等效模型。图中 b、c、l、C&P、acf、t、r 分别代表系统的换流器、电容器、直流电缆、保护控制以及交流滤波器、换流变压器、电抗器等子系统。各状态框左上角的 f 表示各单元处于故障状态。系统稳态可靠性指标的具

体计算方法可以参考 2.2 节。

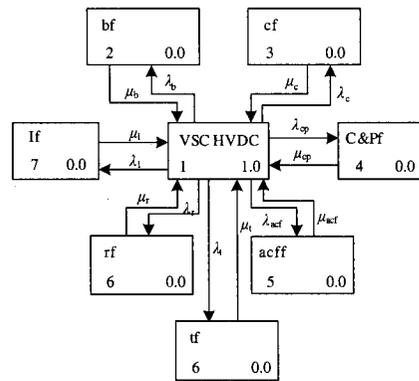


图 8 柔性直流输电系统的状态空间

Fig .8 State space diagram of HVDC flexible transmission system

### 3 算例

表 1 给出了柔性直流输电系统中各单元的可靠性数据。由于目前我国还未有实际运行的系统, 所以表 1 中的各单元的原始数据是借鉴传统 HVDC 的历年统计数据 and 国内外公开发表的文献中的数据、并参考柔性直流输电系统相应元件的可靠性数据得来的。关于阀臂数据给以说明: 该数据主要考虑的是采用 IGBT 时的情况。虽然 IGCT 也是一种选择, 同时它相对于 IGBT 有更高的单器件可靠性, 但是由于其价格上的劣势, 使得其在柔性直流输电工程未能获得使用, 因此本文中并未考虑。同时考虑到柔性直流输电技术应用过程中的一个关键因素为换流器的可靠性水平, 所以阀臂数据的准确性水平关系到整个评价指标的可靠度。对阀臂的可靠性参数主要是参考目前国内外以晶闸管构成阀臂的直流输电运行统计数据, 对不同电压等级并未进行区分。也即阀臂的原始参数即是在设计建设各电压等级的柔性直流输电工程中, 阀臂必须达到的可靠性水平, 其可靠性指标可以通过阀臂内冗余的设置加以实现。表 2 给出了经计算后的系统可靠性指标。

目前已投入运行的柔性直流输电工程无一例外的都是由 ABB 公司完成的。根据 ABB 公司的数据资料, 已运行的柔性直流输电的能量可用率在 98% 以上。通过对比表 2 和表 3, 可以看出使用等效模型计算出的可靠性指标与 ABB 的实际指标较吻合。

表 1 柔性直流输电电子系统可靠性原始参数<sup>[9~11]</sup>

Tab. 1 Original reliability parameters of HVDC flexible transmission system

组合元件	工作时间/小时	故障率/(次/年)	维修时间/小时	修复率/(次/年)	安装时间/小时	安装率/(次/年)
阀臂(两电平)	280320	0.03125	18	486.667	0.75	11680
变压器(三相)	283495.1456	0.0309	24	365.000	1	8760
控制及保护	6689.576174	1.3095	8	1095.000	0.8	10950
交流滤波器	105162.0648	0.0833	10.5	834.286	1.2	7300
换流电抗器	1330296.128	0.006585	25	350.400	1.2	7300
直流电容器	175200	0.05	11.55	758.442	2	4380
直流线路	13246.63542	0.6613	8.86	988.713	1.5	5840

表 2 整个柔性直流输电系统可靠性相关指标(0备用)

Tab. 2 Reliability indices of HVDC flexible transmission system (0 spare)

	100%容量运行	0%容量运行(停运)
发生频率(次/年)	5.2068	5.2068
平均持续时间(年)	0.1908	0.0013
总持续时间(小时)	8705.6	54.3
总等值停运时间(小时)	能量可用率	能量不可用率
54.3	0.9938	0.0062

表 3 ABB 柔性直流输电工程统计指标<sup>[12]</sup>

Tab.3 Reliability indices of HVDC light in ABB

HVDC Light 一极	
强迫停运率	每年 1 到 2 次
强迫停运造成的不可用率	0.3%到 0.5%
可用率	大于 99%

## 4 结论

柔性直流输电技术目前在我国尚属研究阶段,为了更好地为将来实际工程的运行提供指导性意见,需要对其可靠性评估进行研究。本文对柔性直流输电系统进行了划分,建立了各个子系统的可靠性模型。并通过模型组合的方法建立了柔性直流输电系统的等效模型,求出了系统的稳态可靠性指标。通过和 ABB 公布的已经运行工程数据的比较,说明该方法可以很好地用于柔性直流输电系统的评估方法中。

## 参考文献

- [1] Sood V K. 高压直流输电与柔性交流输电控制装置[M]. 徐政译.北京:机械工业出版社,2006.
- [2] Bahrman M, Johnson B. The ABCs of HVDC Transmission Technologies[J].IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.

- [3] ABB. It is Time to Connect [EB/OL]. [2007.12.08]. <http://www.abb.com/cawp/GAD02181/C1256D71001E0037C12569C90043452F.aspx>.
- [4] 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.
- [5] 任震,武娟,陈丽芳.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):38-40. REN Zhen, WU Juan, CHEN Li-fang. Equivalent model for HVDC Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-40.
- [6] 浙江大学发电教研组直流输电教研组.直流输电[M].北京:电力工业出版社,1982.
- [7] 郭永基.可靠性工程原理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 李文沅.电力系统风险评估模型、方法和应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [9] 重庆大学,南方电网公司.特高压直流输电系统可靠性指标研究[R].广州:南方电网技术研究中心,2006.
- [10] 电监会可靠性管理中心.2006年全国直流输电系统运行可靠性指标[R].北京:电监会可靠性管理中心,2007.
- [11] 电监会可靠性管理中心.2006年220kV及以上电压等级变压器、断路器、架空线路等13类输变电设施的运行可靠性指标[R].北京:电监会可靠性管理中心,2007.
- [12] ABB. HVDC-Light Reliability and Availability[EB/OL]. [2007.11.01].<http://www.abb.com/cawp/gad02181/ec5e2c663b412cfcc125719b00331167.aspx>.

收稿日期:2008-01-21; 修回日期:2008-03-04

作者简介:

丁明(1956-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源利用、柔性输电系统的仿真与控制等;

毕锐(1979-),男,博士研究生,讲师,研究方向为电力系统可靠性、新能源利用;E-mail:biruizz@126.com

王京景(1983-)男,博士研究生,研究方向为电力系统可靠性。