

高压直流输电系统系列书

高压直流输电系统 可靠性评估

任震 黄雯莹 冉立 编著

中国电力出版社

==== 高压直流输电系列书 =====

高压直流输电系统 可靠性评估

任震 黄雯莹 冉立 编著

中国电力出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高压直流输电系统可靠性评估/任震等编著. -北京: 中国电力出版社, 1996

(高压直流输电系列书)

ISBN 7-80125-107-5

I. 高… II. 任… III. 高电压-直流-输电-可靠性评估
IV. TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 24108 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)
北京市社科印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

1996 年 7 月第一版 1996 年 7 月北京第一次印刷
787×1092 毫米 32 开本 5.125 印张 111 千字
印数 0001—2770 册 定价 5.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

自从 50 年代中期世界上第一条工业性的高压直流输电线路投运以来,随着高电压、大容量晶闸管的制造水平及控制理论和技术的发展,加之直流输电具有①本身无稳定性问题;②利用其迅速而精确的调节性能可以提高与之并联的交流线路的稳定性和传输容量;③将其作为大区电网间的联络线能提高互联系统运行可靠性和灵活性等主要技术经济特点,高压直流输电越来越受到人们的重视。

当今,全世界有 40 多项高压直流输电工程以其特有的性能在电力系统中发挥作用,并成为与交流系统相辅相成的有效环节。这些工程以其多年可靠运行的经历和所累积的经济效益显示出了直流输电的发展前景。

我国幅员广阔,水能和化石能源蕴藏地与用电负荷中心的地理分布很不平衡,远距离输电已成为不可避免的现实问题。大陆与海岛之间电能输送的完成,大城市供电中架空线走廊缺少和短路容量增大的解决等问题日趋重要和迫切。因此,在我国发展和应用直流输电及其技术是十分必要的。

我国自行建成的舟山 100kV 海底电缆直流送电和引进的葛洲坝—上海±500kV 直流输电工程的相继投产,使直流输电的可行性和可靠性得以证实,从而增强了人们对直流输电的兴趣和信心。

我国有关专业的高校和科研、生产单位一起,曾参加过 31kV 直流输电、舟山工程、葛—上线工程、大区间直流联网的可行性论证,三峡工程电力系统与重大装备的国家科技攻

关项目及国家教委重点科研项目“高压交直流输电理论及其应用”等多方面的研究工作。

为深入地交流和更好地开展有关高压直流输电的研究工作，巩固研究成果，并使这些研究成果在我国获得更广泛的应用，我们将多年的研究成果和参加舟山工程、葛—上线路工程等所得的实践经验整理成这套高压直流输电系列书，包括控制系统、故障分析、谐波与滤波、动态过程仿真、可靠性和稳定性分析等六个方面的专著。

本书是可靠性评估部分。全书实际上是作者们十多年来科研工作的有关研究报告、研究成果及论文的汇编、整理和总结。本书由任震主编，冉立执笔第一、二、五、六章初稿，黄雯莹执笔第三、四章初稿，最后全书由任震、黄雯莹多次修改、整理完成。

夏道止教授对本书进行了详细的审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。此外，本书还得到了华北电力大学杨以涵教授、天津大学贺家李教授、浙江大学戴熙杰教授、重庆大学江泽佳教授、电力部电科院王平洋教授高工以及电力部科学技术情报研究所何大愚教授高工、重庆大学王官洁副教授的指导性帮助，特在此向他们致以深切的谢意。中国电力出版社责任编辑陈涛同志做了大量深入细致的工作，给我们留下了深刻的印象，一并表示感谢。

由于水平有限，缺点和错误难免，我们诚恳地欢迎读者批评指正。

编 者

1995年9月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 高压直流输电系统可靠性研究概况	1
第二节 高压直流输电系统可靠性评估的特点	4
第三节 高压直流输电系统可靠性技术发展动向	7
第二章 典型的高压直流输电系统及其主要 可靠性指标	9
第一节 高压直流输电系统的典型结构及主要 可靠性指标	9
第二节 交直流并联输电系统可靠性评估的特点	13
第三节 交直流网络系统可靠性评估的特点	16
第三章 可靠性评估的数学基础	18
第一节 引言	18
第二节 建模的基本概念	19
第三节 状态空间图	30
第四节 频率和平均持续时间	33
第五节 状态空间分析法	39
第四章 可靠性评估的 FD 法	43
第一节 引言	43
第二节 子系统的划分及等效模型	44
第三节 高压直流输电系统状态空间图的建立	47
第四节 计算机计算方法和计算实例	61
第五节 参数灵敏度分析	63
第六节 备用策略的研究	70
第五章 可靠性的 Monte Carlo 模拟	74

第一节	引言	74
第二节	Monte Carlo 模拟法的基本原理	75
第三节	按状态抽样的 Monte Carlo 模拟法	79
第四节	按状态抽样的 Monte Carlo 法的局限性	90
第五节	Monte Carlo 法与解析法的结合	93
第六节	带权加速 Monte Carlo 法	101
第七节	短期可靠性评估的 Monte Carlo 法	104
第八节	系统实际条件的考虑	108

第六章 交直流并联输电系统及网络系统的

可靠性评估

第一节	引言	111
第二节	交直流并联输电系统可靠性评估的运算条件	111
第三节	交直流并联输电系统可靠性 Monte Carlo 模拟	119
第四节	计算实例	125
第五节	计划检修期内风险度评估及检修安排	131
第六节	交直流网络系统故障后的有功优化调整	136
第七节	大型交直流网络系统可靠性评估	147
参考文献		155

第一章 绪 论

70 年代以来,可靠性技术逐渐成为现代高压直流输电的重要研究领域之一,并且在进行直流输电方式与交流输电方式的比较时,可靠性也常是人们非常关注的一个重点问题。国际大电网会议(CIGRE)成立了专门的工作组,从 70 年代开始对世界各国已投运的高压直流输电工程进行了连续不断的可靠性统计和分析,足见国际上对这一问题的重视。

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指标也已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素。高压直流输电技术目前主要用于远距离大功率输电、大区联网和系统间非同步联络以及地下或海底电缆送电等。所有这些工程应用都对高压直流系统的可靠性提出了很高的要求,而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。因此定量评估高压直流输电系统的可靠性指标,分析各种影响因素,并提出相应的对策,是一项十分重要的工作。高压直流输电系统可靠性评估方法的研究,一直受到高等学校、研究机构、设计部门、设备制造厂家以及生产运行单位的高度重视。

第一节 高压直流输电系统 可靠性研究概况

交流电力系统的可靠性研究迄今已有半个多世纪的历史,研究成果已经相当广泛地应用于电力系统的规划、设计

及运行等各个阶段。相比之下，高压直流输电系统可靠性研究的起步则要晚得多，所取得的成果在数量及质量上都与交流系统的可靠性研究存在较大的差距。但是目前可靠性研究对任何一个高压直流输电工程都已成为不可缺少的内容。高压直流输电系统可靠性研究在实际工程中所取得的巨大经济效益和社会效益，也已经被各系统长期运行中所积累的技术、经济指标以及大量的统计资料所证实。

可靠性技术在高压直流输电工程中的早期应用有加拿大的伊尔河工程 (Eel River HVDC System)，这项工作是由美国 GE 公司进行的。可靠性技术被用来确定系统设计中应考虑冗余结构、备品备件管理、故障监视报警以及在线检修手段等问题如何得到妥善的解决。当时使用的可靠性技术包括：①系统可靠性预测 (评估)；②可靠性指标的目标分解；③故障模式及后果分析 (FMEA)；④冗余技术等。

有关高压直流输电系统可靠性评估方面的第一篇论文是加拿大的 R. Billinton 在 1968 年发表的。同年，国际大电网会议 (CIGRE) 也开始对高压直流输电工程进行可靠性统计和分析。

最早用于高压直流输电系统可靠性评估的方法是概率分布法 (Probability distribution method)。R. Billinton 等人曾用此方法对英国的金思诺斯 (Kingsnorth) 工程作了可靠性评估。概率分布法系根据各元件的故障概率来计算高压直流输电系统的可用输送容量随机地处在各种可能状态下的概率，并以此作为评估高压直流输电系统可靠性的基础指标。这种评估方法在概念上比较简单，使用起来也方便、灵活。但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，该方

法没有较强的系统性，建立元件故障与系统处于各种容量状态的概率关系是一项十分繁琐的工作，并且容易出错。所有这些使得概率分布法在实际工程中的应用受到很大的限制。

随着 Markov 过程的基本理论和模型引入电力系统的可靠性评估，R. Billinton 等人又提出了高压直流输电系统可靠性评估的频率和持续时间 (FD) 法^[1]。FD 法着眼于建立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各种复杂的技术条件。FD 法评估的主要可靠性指标有系统可用输送容量处于各种状态的概率、频率及平均持续时间等。通过计算这些指标，可以更深刻地反映高压直流输电系统可靠性的特点。

另一方面，国际大电网会议所成立的专门工作组经过多年的努力，不仅获得了大量对评估高压直流输电系统可靠性十分重要的统计资料，而且从实践中提出了一套比较完整的可靠性指标^[5,6]。这些工作为从理论上对高压直流输电系统可靠性评估进行更深入的研究创造了条件。

80 年代初，国内开始了高压直流输电系统的可靠性研究。研究工作一方面针对葛洲坝—上海超高压直流输电系统这一实际工程的需要，另一方面，就可靠性模型、评估方法、可靠性指标、原始参数以及可靠性综合分析和决策等开展了较系统的理论研究。根据 Markov 过程的基本原理，提出了累积状态之间转移频率和等效转移率等新的概念以及有关的性质，从而，丰富了可靠性理论，发展了高压直流输电系统可靠性评估的 FD 法^[15]。针对高压直流输电系统可靠性原始参

数的不精确性，提出了可靠性评估中参数灵敏度分析的概念和方法（见本书第四章第五节）。此外，还对高压直流输电系统的备用策略、同杆双极直流线路的共同模式故障等问题进行了一定的研究。这些研究成果比国外同一领域的研究前进了一步，对全面评估高压直流输电系统的可靠性水平以及提出有效的增强措施等都具有重要的意义。

1987年以来，由于长江三峡至华东交直流并联系统这一新型输电方式的需要，国内还进行了高压交直流并联系统可靠性的研究工作，同时对进一步发展形成的交直流网络系统的可靠性评估也作了较系统的研究。这些方面的研究工作，在国外几乎还处于空白状态。由于系统的运算条件趋于更加复杂、系统规模更加庞大，提出了 Monte Carlo 模拟法与解析法相结合的可靠性评估的新方法^[18]。有关的成果对交流电力系统的可靠性评估也具有一定的参考价值。

第二节 高压直流输电系统可靠性评估的特点

定性地讲，由于双极直流线路只有两根导线，因此直流线路的可靠性比相同电压等级的交流线路要高；而且当一极线路发生故障时，另一极可与大地构成回路，继续输送一半的功率，从而提高了运行的可靠性。特别是当直流系统未满载时，健全的一极可以承担故障极所送功率的相当部分或全部。但是直流系统两端换流站设备比交流系统变电站的设备要多而且复杂，换流装置具有的过负荷能力非常有限，这些又对高压直流输电系统的可靠性水平产生了不利的影响。

随着换流装置性能的改善，特别是随着晶闸管阀的发展

和日趋完善，换流站的可靠性水平已得到显著提高。对用于远距离大功率输电的现代高压直流输电系统，换流站的可靠性水平已不再是影响整个高压直流输电系统可靠性的最主要因素。如果对换流站中的关键部件采取适当的备用，情况就更是如此。图 1-1 给出了 CIGRE 统计的 1975~1981 年世界各国高压直流输电系统换流站的强迫电能不可用率（其含义将在后面的章节中阐明），说明使用晶闸管阀大大提高了换流站的可靠性。

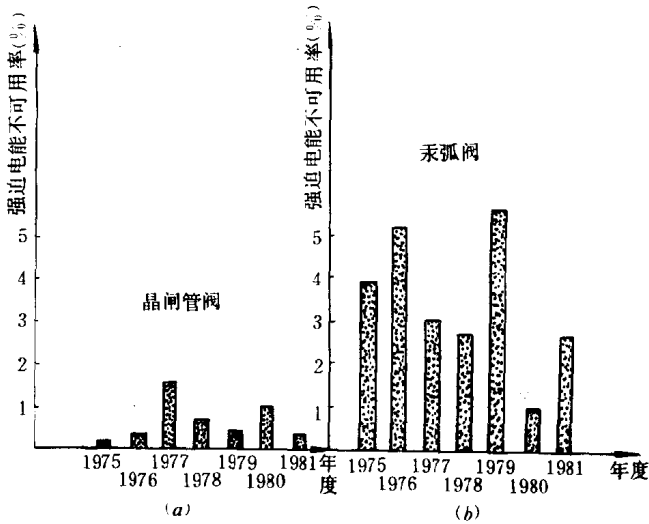


图 1-1 换流站强迫电能不可用率

- (a) 使用晶闸管阀的换流站的强迫电能不可用率；
- (b) 使用汞弧阀的换流站的强迫电能不可用率

输电线路的强迫停运可能在很大程度上影响整个高压直流输电系统的强迫电能不可用率，当然，也不能忽视输电线路长度及架空线路或海底电缆输电的影响。

为了定量地评估高压直流输电系统的可靠性水平并深刻揭示高压直流输电系统在可靠性方面的特点，需要充分考虑到高压直流输电系统的一些重要特性。

(1) 高压直流输电系统包括了交、直流侧的各种部件或子系统，因此其结构比高压交流输电系统要复杂。在可靠性评估中应该反映各种部件或子系统的不同故障模式及其对整个高压直流输电系统可靠性的影响。

(2) 高压直流输电系统的运行方式也显得复杂和多样。例如两极直流线路在一定条件下可以相互切换；同一端两极下的交流滤波器可能相互切换使用或者当某些滤波支路故障退出后，可以将高压直流输电系统处于降额运行状态而不必完全停运；对于线路绝缘水平降低的情况可以考虑采取降低直流电压的方式运行等。所有这些都要求在高压直流输电系统可靠性评估的运算条件中应能准确地反映各具体工程系统的实际情况。

(3) 高压直流输电系统中各部件或子系统的运行状态彼此并不独立。例如当某一部件故障引起一极停运时，该极中的其它部件（除直流线路）都不会进一步发生故障或其故障率比通电后要显著减小；换流装置中各晶闸管元件发生故障可能也不是独立的，例如系统遭受一次冲击引起一批晶闸管元件的损坏，而现代高压直流输电系统大多在晶闸管元件上采用了串联冗余结构；两极直流线路常常同杆架设，它们发生共同模式故障的情况也应得到适当的考虑。

(4) 由于开展高压直流输电系统可靠性研究的时间不长，虽然国际上的一些机构进行了大量的统计工作，但作为可靠性评估基础的原始数据仍存在较大的分散性，因此在高压直流输电系统可靠性评估中对某些不确切因素作一定范围

的灵敏度分析也是必要的。

(5) 交直流并联系统和交直流网络系统可靠性评估的特点, 除系统规模更加庞大、运算条件更加复杂之外, 交、直流系统间存在的较强耦合作用必须充分考虑。有关的特点在后面章节中将作具体的介绍。

基于上述特点, 高压直流输电系统的可靠性评估在指标模型及算法上都具有相应的特点和要求。

第三节 高压直流输电系统可靠性 技术发展动向

在工程实际应用方面, 可靠性已成为高压直流输电系统规划及设计中考虑的主要因素。例如, 近期在美国 IPP 高压直流输电工程 (Intermountain HVDC System) 中, 已明确提出要求使双极直流输电系统的可靠性水平能达到或超过输送容量及输送距离都相当的双回交流线路的可靠性水平。这些情况对换流站以致整个高压直流输电系统的结构和参数设计、元件的质量和可靠性水平、备品备件方案等都提出了相应的要求。

在理论和方法方面, 已发展到研究高压直流输电系统可靠性水平对整个电力系统可靠性的影响。在用高压直流输电系统实现大区联络的情况下, 研究通过直流互联的电力系统的有关可靠性问题已成为必要。随着交直流并联输电方式的形成以及超高压输电网络的进一步发展, 交直流并联系统及交直流网络系统的可靠性评估也将成为十分重要的研究课题^[19]。

随着研究领域的扩大, 对可靠性评估的方法提出了更高

的要求,太系统可靠性评估的各种困难和问题亦将日益明显。

关于高压直流输电系统运行中的一些可靠性问题,包括计划检修期内的风险度评估及检修计划的安排等也越来越引起人们的注意。作为在运行中提高高压直流输电系统可靠性水平的技术措施,系统设备运行状况的在线监测及在线维护等方面的研究也一直受到有关部门的重视并取得了有实际应用价值的成果。

本书将系统地介绍高压直流输电系统可靠性评估的原理和方法;同时在第六章中将对交直流并联输电系统以及交直流网络系统可靠性评估的有关问题进行比较深入的分析和研讨。

第二章 典型的高压直流输电系统及其主要可靠性指标

各个具体高压直流输电系统的结构可能有不同的形式，运行条件也可能有一定的差异，但重点考虑比较典型的结构和运行条件仍不失为一种合理的抽象和简化。这样不仅有助于阐明有关的概念和方法，而且也使得高压直流输电系统、交直流并联系统以及交直流网络系统可靠性评估问题的特征更加突出。

本章分别就高压直流输电系统、交直流并联系统以及交直流网络系统的可靠性评估，介绍有关的典型接线模式、典型运行条件和主要的可靠性指标。

第一节 高压直流输电系统的典型结构及主要可靠性指标

由于晶闸管技术的发展和出于对滤波器设计的考虑，现代高压直流输电系统普遍采用双极双桥 12 脉波接线方式。高压直流输电系统由换流阀桥、换流变压器、交流滤波器组、控制及保护系统、直流线路以及线路极设备（如直流滤波器组、平波电抗器）等组成。

对于高压直流输电系统可靠性评估中的运算条件，一般作如下基本假设：

- (1) 元件和系统是可维修或可更换的。
- (2) 元件在失电（即不承受应力）状态下不会发生新的

故障（直流输电线路应除外）。

(3) 直流输电系统允许采用以大地作为回路的运行方式。由于现代12脉波高压直流输电系统中一般都不装设5次和7次交流滤波器以及6次直流滤波器，因此不允许出现单极6脉波的运行方式。这样，直流输电系统共有3种可用容量状态：双极运行的100%容量、单极运行的50%容量、双极停运的0容量。

(4) 正、负两极的直流输电线路（不包括有关的极设备），在需要时可以相互切换。

(5) 同侧两极上的交流滤波器组在需要时可相互交换。

对于主要目的是用作远距离、大功率输电的高压直流输电系统，其可靠性指标是从输送能力的角度来定义的。主要有如下几项^[5]：

1. 可用率 A (availability)

$$A = \left(1 - \frac{TEOT}{8760} \right) \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 总等值停运时间 $TEOT = E \left[\sum_i EOT_i \right]$ ，而 EOT_i 是一年中第 i 次停运的等值停运时间，它是实际停运时间 T_i 按停运容量在系统额定容量中所占比例进行折算后的数值，即

$$EOT_i = T_i \left(1 - \frac{\text{停运期间可用容量}}{\text{系统额定容量}} \right)$$

2. 不可用率 U (unavailability)

$$U = 100\% - A \quad (2-2)$$

3. 能量利用系数 EUR (energy utilization factor)

$$EUR = \frac{\text{全年实际输送电能}}{8760 \times \text{系统额定容量}} \times 100\% \quad (2-3)$$

4. 能量可用率 EA (energy availability)