高压直流输电工程可靠性指标统计分析

张禄琦[1]，周家启[1]，刘 洋[1]，谢开贵[1]，刘 威[1]，金小明[2]
(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室，重庆市 400044)
(2. 南方电网技术研究中心，广东省广州市 510620)

摘要： 通过国外 1998 年—2002 年和国内 2001 年—2005 年高压直流输电工程运行可靠性统计资料的分析比较，归纳出影响其可靠性水平的主要因素及其变化趋势。利用这些结果，结合国外高压直流输电工程运行资料，对单 12 脉接线方式和双 12 脉接线方式直流输电系统的可靠性进行了综合分析，为高压直流输电系统可靠性的研究、运行管理提供一定的参考信息和决策依据。

关键词： 高压直流输电；可靠性；统计分析

中图分类号： TM721.1；TM732

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，高压直流输电可靠性已成为影响整个电力系统安全可靠运行的重要因素。高压直流输电技术主要用于远距离大功率输电、区域联网等场合，因而对高压直流输电工程的可靠性提出了很高的要求，而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效益。因此，高压直流输电工程的可靠性评价以及各种影响因素的分析十分重要[1]。

中国现已投运的±500 kV 超高压直流输电工程有葛南、龙政、江城、天广和贵广工程[2]，它们的各项可靠性指标高低不一。早期投运的葛南工程可靠性水平相对较低，相继投入的其他直流输电工程采用了最新技术，可靠性水平有所提高，但因运行时间较短，数据样本量少，其统计指标不具代表性。

本文根据国际大电网会议 14.04 工作组每年定期发布的直流输电系统可靠性研究报告以及国内相关管理部门发布的统计资料，对国内外主要远距离大容量高压直流输电工程的可靠性指标进行了综合分析，期望能为高压直流输电工程可靠性研究工作和运行管理提供一定的参考。

1 高压直流输电工程可靠性统计分析方法

现代高压直流输电工程一般采用双极双桥 12 脉动换流阀的接线方式[3]。根据每极采用换流阀组个数不同，双极双桥 12 脉动换流阀的接线方式可分为单 12 脉接线和双 12 脉接线[4]。单 12 脉接线每极仅有 1 个 12 脉动换流阀组，任一换流阀组故障均可导致单极停运。国外许多高压直流输电工程以及国内已投入运行的 5 个±500 kV 直流输电工程都采用该接线方式[5]。双 12 脉接线每极有 2 个 12 脉动换流阀组，通过换流器两端多个开关的切换，可在每极任一换流阀组故障情况下，保持该极的部分运行。根据每极 2 个阀组的连接方式，双 12 脉接线可分为串联方式和并联方式[4]。国外 Itaipu 等高压直流输电工程采用双 12 脉接线方式。

根据对高压直流输电工程输送容量的影响，按以下 3 类停运模式分别进行统计：

1)阀组子系统，包括换流变压器、阀组、阀控等元件停运的各种故障或计划停运。

2)极子系统，包括直流滤波器、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，包括由主站控系统、接地极、无功补偿装置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。

高压直流输电系统通常用做远距离大功率输电和背靠背直流输电，其主要可靠性指标是从输送能力的角度来定义的。按照 CIGER SC14 WG04 的定义，本文涉及的高压直流输电系统可靠性统计指标可参阅文献[6]。

2 高压直流输电工程可靠性统计分析

2.1 强迫停运事件统计

表 1～表 8 为国内外主要远距离大容量高压直流输电工程相关可靠性指标的统计数据。

表 1 为国外 8 个典型直流输电工程的单极强迫停运次数(MUOT)、双极强迫停运次数(BUOT)和

收稿日期：2007-02-10；修回日期：2007-04-30。
中国南方电网公司项目资助。

12 脉动换流阀组强迫停运次数(VFOT)以及实际停运平均持续时间[6-8];表 2 为国内 5 个典型直流输电工程的单极、双极强迫停运次数[2,5,9-10]。

由表 1 数据可计算得到 1999 年—2002 年国外主要远距离大容量高压直流输电工程年平均单极强迫停运次数为 4.3 次,年平均双极强迫停运次数为 1.1 次(如果除去 Cross Channel BP1 和 Cross Channel BP2,则年平均双极强迫停运次数为 0.25 次)。而文献[11]统计分析的 1989 年—1998 年国外高压直流输电工程年平均单极强迫和双极强迫停运次数分别为 9.08 次和 0.64 次。显示出技术进步和管理水平的提高促使强迫停运率降低的趋势。

表 1 单极、双极和阀组强迫停运次数以及实际停运平均持续时间(1999 年—2002 年)

Table 1 MUOT, BUOT, VFOT and actual outage duration of HVDC transmission projects abroad (1999—2002)

工程名称	停运次数			停运时间/h
	双极	单极	阀组	
Skagerrak 1&2	0.2	3.0	0.8	5.2
Square Butte	0.5	7.5	0	5.9
Nelson River BP2	0.2	9.8	31.0	7.6
Hokkaido-Honshu	0.2	1.2	0.2	4.4
CU	0.2	5.5	0	3.0
Gotland 2&3	0	2.2	0	75.4
Cross Channel BP1	2.3	2.7	0	20.2
Cross Channel BP2	5.0	2.3	0	7.1
平均	1.1	4.3	4.0	16.1

表 2 2001 年—2005 年全国高压直流输电工程强迫停运次数统计

Table 2 MUOT and BUOT of the national HVDC transmission projects(2001—2005)

工程名称	投运日期	2001 年		2002 年		2003 年		2004 年		2005 年		2001—2005 年平均值	
		单极	双极	单极	双极	单极	双极	单极	双极	单极	双极	单极	双极
葛南工程	1990-09	18.0	10.0	11.0	4.0	6.0	3.0	7.0	1.0	3.0	0.0	9.0	3.6
天广工程	2001-06	20.0	0	10.0	1.0	8.0	0	11.0	0	9.0	1.0	11.6	0.4
龙政工程	2003-06	—	—	—	—	8.0	0	7.0	0	8.0	0.0	7.7	0
江城工程	2004-06	—	—	—	—	—	—	6.0	1.0	6.0	1.0	6.0	1.0
贵广工程	2004-07	—	—	—	—	—	—	5.0	0	11.0	0	8.0	0
平均												8.4	1.0

注:"—"表示该指标没有统计数据。

表 3 1998 年—2002 年国外各类故障强迫停运次数以及等值停运时间的平均值

Table 3 Number of forced outages and equivalent outage duration of HVDC transmission projects abroad

工程名称	投运年份	交流设备故障		阀故障		控制保护故障		直流设备故障		输电线路故障		其他		总计	
		次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h
Skagerrak 1&2	1977	2.5	3.4	0	0	0.5	6.2	0.8	3.8	0.5	227.5	0.8	0.1	4.2	240.9
Skagerra k3	1993	2.8	4.3	0	0	0	0	0	0	1.0	2.1	0.5	0.7	4.2	6.9
Square Butte	1977	4.0	12.6	0.5	5.8	1.0	0.4	1.5	14.7	4.5	100.3	1.0	2.6	12.5	251.1
Hokkaido-Honshu	1993	0.6	1.5	0	0	0.6	1.6	0	0	0.4	38.2	0	0	1.6	41.3
Nelson River BP2	1983	17.4	691.7	18.4	6.7	10.0	7.6	4.8	1.9	1.2	0.1	3.6	2.7	44.8	710.8
Virginia Smith	1988	3.8	345.2	2.2	1.5	0.4	0.6	0	0	—	—	2.6	5.5	8.6	352.9
Konti Skan 2	1988	1.6	13.9	0	0	1.8	20.9	0.8	5.4	0	0	0.6	2.0	4.8	42.2
Fennoskan	1990	1.4	16.1	0.2	0.2	1.8	13.6	0.6	0.6	0	0	0.4	0.2	4.4	30.8
平均		4.3	136.1	2.7	1.8	2.0	6.4	1.1	3.3	1.0	46.0	1.2	1.7	10.6	209.6

注:"—"表示该指标没有统计数据。

表 4 2001 年—2005 年国内各类故障强迫停运次数以及等值停运时间的平均值

Table 4 Number of forced outages and equivalent outage duration of national HVDC transmission projects

工程名称	投运日期	交流设备故障		阀故障		控制保护故障		直流设备故障		输电线路故障		其他		总计	
		次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h
葛南	1990-09	5.4	720.3	3.4	39.2	8.0	150.2	1.6	13.8	4.0	139.6	2.6	1 182.2	25.0	2 245.2
天广	2001-06	10.8	268.0	4.8	40.5	12.6	77.1	5.8	77.4	4.6	114.6	2.8	210.3	41.3	787.9
龙政	2003-06	4.0	54.0	0.3	4.4	4.7	29.7	0	0	4.0	42.1	0.3	497.8	72.5	627.8
江城	2004-06	1.5	11.3	0	0	3.0	19.3	3.0	37.5	3.0	62.6	2.5	122.6	13.0	253.4
贵广	2004-07	5.0	460.9	1.0	17.7	3.0	33.2	0	0	1.0	0.5	1.0	1.4	11.0	513.0
平均		5.3	302.9	1.9	20.4	6.2	61.9	2.1	25.8	3.3	71.9	1.8	402.9	32.6	885.5

注:葛南、龙政和江城工程 2005 年只统计了停运次数,没有持续时间;天广工程是 2001 年—2005 年的平均值;龙政工程是 2003 年—2005 年的平均值;江城工程是 2004 年—2005 年的平均值;贵广工程仅为 2005 年的统计值。

由表 2 可知,国内现在已投入运行的高压直流输电工程的年平均单极强迫停运次数为 8.4 次,高于国外平均水平 4.3 次(见表 1),而年平均双极强迫停运次数为 1.0 次,稍低于国外平均水平 1.1 次(见表 1)。葛南工程 2001 年—2005 年的年平均单极强迫停运次数(9.0 次)高于国外其他直流工程平均值(4.3 次),但是比文献[11] 中 1989 年—2000 年的年平均单极强迫停运次数(18.6 次)低, 说明葛南工程单极强迫停运次数呈显著下降趋势。葛南工程双极年平均强迫停运次数(3.6 次)高于国外同期投产工程(平均值 1.1 次)的水平。但是从表 2 可见,其双极强迫停运也呈下降趋势,同时,天广工程的强迫停运次数也在逐年减少。

龙政、江城、贵广工程和天广工程的单极强迫停运次数分别达 7.7 次、6.0 次、8.0 次和 11.6 次,高于国外平均水平(4.2 次),而年平均双极强迫停运次数分别为 0 次、1.0 次、0 次和 0.4 次,低于国外平均水平(1.1 次)。由于这些工程尚处于建设初期,数据不具代表性。

2.2 可靠性薄弱环节分析

有必要对影响系统停运的设备故障进一步细分,以便进行系统薄弱环节分析。按照 CIGRE 的建议,将引发高压直流输电系统强迫停运的设备分为以下 6 种类型:交流系统及其辅助设备;换流阀(包括换流阀冷却工程);高压直流输电系统的控制和保护设备;其他直流系统一次设备;架空或电缆输电线路;其他。

表 3 和表 4 分别为国外 8 个和国内 5 个高压直流输电系统各类故障引发的强迫停运次数以及相应的等值停运时间[2,4,6-8,10,12]。

由表 3 数据计算可知,各类因素引起的强迫停运占整体影响因素的比例为:交流及辅助设备 69%,输电线路 24%,控制保护设备 3%,直流设备 2%,阀和其他各 1%。由此可见,目前交流及其辅助设备故障是引起直流输电工程强迫停运的首要因素。也就是说,对用于远距离大容量输电的现代高压直流输电工程,换流站的可靠性水平已不再是影响整个高压直流输电工程可靠性的最主要因素。其次,输电线路引起的强迫停运占 24%,这里主要包括绝缘老化、线路覆冰、气候等问题[12],也是影响高压直流输电工程可靠性的重要因素之一。

由表 4 的数据计算可知,各类因素引起的强迫停运占整体影响因素的比例为:其他因素 46%,交流设备故障 34%,输电线路 8%,控制保护 7%,直流设备 3%,换流阀 2%。可见,国内除了“其他因素”外,另外的所有设备因素对系统强迫停运的影响与图外所得到的结论几乎一致。国内外“其他因素”统计值的这一差异,主要因为国内是将年度计划检修、设备的集中消缺和人为因素等都统计在“其他因素”中。如果除去非设备因素的影响,国内的设备因素对系统强迫停运的影响比例应该与国外的结论相一致。

2.3 能量可用率和能量利用率统计

能量可用率(EA——energy availability)和能量利用率(energy utilization)是衡量高压直流输电工程可靠性的重要指标。表 5 是 2001 年—2005 年国内主要远距离大容量高压直流输电工程的相应指标[2,5,9-10],它们的平均值分别为 90.8%和 57.8%;表 6 是 1998 年—2002 年国外主要远距离大容量高压直流输电工程的相应指标[7-8,12],它们的平均值分别为 95.4%和 48.7%。

表 5 2001 年—2005 年国内工程 EA 和能量利用率统计

Table 5 EA and energy utilization on HVDC transmission projects abroad (2001—2005)

工程名称	投运日期	额定容量/MW	EA 平均值/(%)	能量利用率平均值/(%)
葛南	1990-09	1 200	78.6	52.7
天广	2001-06	1 800	91.8	43.0
龙政	2003-06	3 000	95.7	73.0
江城	2004-06	3 000	95.2	61.2
贵广	2004-07	3 000	92.7	59.2
平均			90.8	57.8

表 6 1998 年—2002 年国外工程 EA 和能量利用率统计

Table 6 EA and energy utilization on HVDC transmission projects abroad (1998—2002)

工程名称	投运年份	额定容量/MW	EA 平均值/(%)	能量利用率平均值/(%)
Skagerrak 1&2	1977	550	98.1	36.0
Skagerrak 3	1993	500	97.6	49.7
Square Butte	1977	550	90.1	71.8
Hokkaido-Honshu	1993	600	95.5	11.5
Nelson River BP2	1983	2 000	89.2	65.3
CU	1979	1 138	97.0	73.3
Gotland 2&3	1987	320	98.2	28.9
Highgate	1985	200	98.6	78.4
Virginia Smith	1988	200	93.2	41.7
KontiSkan 2	1988	300	96.4	29.9
平均			95.4	48.7

可见,国内高压直流输电工程的 EA 平均值(90.8%)低于国外的平均水平(95.4%),尤其是葛南工程最低,仅为 78.6%,这主要是葛南工程较早投运,受近年来的系统大修、设备改造等因素影响所致[12]。而国内高压直流输电工程的能量利用率平

均值(57.8%)高于国外平均水平(48.7%),说明国内高压直流输电工程主要是以送电为主要目的。

2.4 单12脉与双12脉高压直流输电工程比较

表7和表8分别给出1988年—2002年单12脉和双12脉高压直流输电工程的强迫停运次数、平均持续时间和能量不可用率(EU——energy unavailability)[7-8,12]。可以看出,单12脉和双12脉高压直流输电工程的单极强迫停运次数平均值分别为3.1次和1.5次,双极强迫停运次数平均值分别为0.5次和0.2次,EU分别为5.0%和9.6%。

表7 单12脉直流输电工程的强迫停运次数、平均持续时间和EU

Table 7 Number and duration of forced outages and EU on HVDC transmission projects with one converter per pole

工程名称	投运年数	单极平均值		双极平均值		EU平均值/(%)
		次数	时间/h	次数	时间/h	
Skagerrak 1&2	14.0	1.7	18.6	0.1	1.0	1.9
Square Butte	12.0	2.9	7.6	0.3	2.0	9.1
CU	14.0	2.0	2.0	0.2	2.3	1.6
Gotland 2&3	14.0	0.4	46.3	0.2	1.2	9.8
Rihand-Dadri	8.6	8.6	5.0	1.4	1.4	2.6
平均		3.1	15.9	0.5	1.6	5.0

表8 双12脉直流输电工程的强迫停运次数、平均持续时间和EU

Table 8 Number and duration of forced outages and EU on HVDC transmission projects with two converters per pole

工程名称	阀组平均值		单极平均值		双极平均值		EU平均值/(%)
	次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	
Vancouver P2	1.5	29.0	1.5	5.7	—	—	21.2
Nelson River BP1 pole1	1.7	283.0	1.1	0.9	—	—	12.8
Nelson River BP2	4.0	21.0	2.3	2.6	0.3	3.4	10.8
Itaipu BP1	1.3	18.0	0.7	7.2	0.2	1.3	1.9
Itaipu BP2	1.6	73.0	1.8	0.2	0.2	1.3	1.4

注:"—"表示该指标资料上没有统计;Vancouver P2,Nelson River BP1 Pole1和Nelson River BP2统计的强迫停运次数为1998年—2002年的平均值;EU为1988年—2002年的平均值;Itaipu BP1和Itaipu BP2统计的强迫停运次数为1998年—2000年的平均值,EU为1988年—2000年的平均值。

由此可见,双12脉高压直流输电工程的单极强迫停运率和双极强迫停运率要低于单12脉高压直流输电工程,但是其EU却比单12脉高压直流输电工程高。

上述结果的主要原因分析如下。按照本文的统计方法,双12接线与单12接线相比较,阀组子系统元件(阀组、换流变压器、阀控等)多1倍,从而导致双12系统产生了新的容量状态,例如当一极的一个12脉动换流阀组发生故障时,该极另外一个阀组可以通过切换的方式保证整个系统降容量运行,从而达到延长系统运行时间的目的,降低了直流输电系统单极停运、双极停运的概率和频率,所以双12脉高压直流输电系统的单极强迫停运率和双极强迫停运率均低于单12脉高压直流输电系统。

从EU的定义公式[6]可以看出,它取决于总的等值停运时间。高压直流输电系统的总等值停运时间是系统各容量状态的等值停运时间之和。由于设备的增多,使得双12脉工程相对单12脉工程容量状态增加,同时,由于容量状态数的增加,2个状态之间出现更多的状态转移过程,从而进一步增大了各容量状态的等值停运时间。最终,由于容量状态的增加和状态间转移过程的增多,使得双12脉系统总等值停运时间相比单12脉系统略有增加,所以双12脉高压直流输电系统EU比单12脉高压直流输电系统高。

以上理论分析与实际工程计算结果一致。

3 结语

根据相关统计资料,通过对国外1998年—2002年和国内2001年—2005年主要远距离大容量高压直流输电工程的相关可靠性统计指标进行综合统计分析,可得出以下结论和建议:

1)从强迫停运来看,国内高压直流输电工程的单极强迫停运次数平均值高于国外平均水平,但是双极强迫停运次数平均值与国外平均水平相差不大,随着技术进步和管理水平的提高,国外和国内高压直流输电工程的单极强迫停运次数逐渐降低,而双极强迫停运次数变化不大。

2)从薄弱环节分析来看,国外和国内高压直流输电工程的情况一致:交流系统及其辅助设备故障对系统强迫停运的影响最大,其余依次是直流输电线路故障、控制和保护设备故障、直流一次设备故障、阀故障、其他因素。应该注意的是,国内工程非设备因素(包括年度计划检修、设备的集中消缺、人为因素等)影响强迫停运所占的比重最大,因此,可通过加强运行管理、缩短检修时间以及加强人员培训等措施来提高运行安全水平。

3)从EA和能量利用率来看,国内高压直流输电工程的EA平均水平低于国外,主要是因为国内系统由于计划停运和强迫停运导致的EU相对较高,因而需要研究降低强迫停运的措施和优化预防性维修策略,特别要注意减少双极停运的影响因素;而国内高压直流输电工程能量利用率的平均水平相对较高,说明国内工程充分发挥了联网效用。

4)通过对单12脉和双12脉高压直流输电工程的比较可知,双12脉高压直流输电工程的单极强迫

停运率和双极强迫停运率低于单12脉结构,而EU却较单12脉结构高,该信息对于高压直流输电工程的规划和运行研究工作具有参考价值。

参 考 文 献

[1] 郭永基.电力系统可靠性分析.北京:清华大学出版社,2003.
GUO Yongji. Power system reliability theory and application. Beijing: Tshinghua University Press, 2003.

[2] 贾立雄,蒋锦峰,胡小正.2003年度全国高压直流输电系统运行可靠性分析.电力设备,2004,5(11):70-75.
JIA Lixiong, JIANG Jinfeng, HU Xiaozheng. Operation reliability analysis of nation-wide HVDC power transmission system in 2003. Electrical Equipment, 2004, 5(11): 70-75.

[3] 任震,武娟,陈丽芳.高压直流输电系统可靠性评估的等效模型.电力系统自动化,1999,23(9):38-41.
REN Zhen, WU Juan, CHEN Lifang. Equivalent model for HVDC reliability evaluation. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-41.

[4] 赵畹君.高压直流输电工程技术.北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun. Project technology of HVDC. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[5] 贾立雄,胡小正.2004年度全国直流输电系统运行可靠性分析.电力设备,2005,6(9):72-75.
JIA Lixiong, HU Xiaozheng. Operation reliability analysis of nation-wide HVDC power transmission system in 2004. Electrical Equipment, 2005, 6(9): 72-75.

[6] IEEE 1240—2000 IEEE guide for the evaluation of the reliability of HVDC converter stations. 2000.

[7] CHRISTOFERSEN D J, VANCERS I, ELAHI H, et al. A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 1997～1998 [R/OL]. [2007-02-01]. http://www.cigre.org.

[8] VANCERS L, JCHRISTOFERSEN D, LEIRBUKT A, et al. A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 1999～2000 [R/OL]. [2007-02-01]. http://www.cigre.org.

[9] 喻新强.2003年以来国家电网公司直流输电工程运行情况.电网技术,2005,29(20):41-46.
YU Xinqiang. Summary on operation of SGCC's HVDC projects since 2003. Power System Technology, 2005, 29(20): 41-46.

[10] 贾立雄,蒋锦峰,胡小正.2002年度全国高压直流输电系统运行可靠性分析.电力设备,2004,5(6):67-71.
JA Lixiong, JIANG Jinfeng, HU Xiaozheng. Operation reliability analysis of nation-wide HVDC power transmission system in 2002. Electrical Equipment, 2004, 5(6): 67-71.

[11] 刘海锋,徐政,金丽成.世界远距离大容量高压直流输电工程可靠性调查综述.高压电器,2002,38(3):1-6.
LIU Haifeng, XU Zheng, JIN Licheng. A review of the reliability survey of long distance high power HVDC transmission project throughout the world. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 1-6.

[12] VANCERS L, JCHRISTOFERSEN D, LEIRBUKT A, et al. Survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 2001～2002 [R/OL]. [2007-02-01]. http://www.cigre.org.

张禄琦(1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划和可靠性、高压直流输电技术。E-mail: zhang.luqi@yahoo.com.cn

周家启(1938—),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统规划和可靠性研究。

刘 洋(1977—),男,博士,讲师,研究方向为电力系统规划和可靠性。

Statistical Analysis on Reliability Indices for HVDC Transmission Project

ZHANG Luqi[1], *ZHOU Jiaqi*[1], *LIU Yang*[1], *XIE Kaigui*[1], *LIU Wei*[1], *JIN Xiaoming*[2]

(1. The Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. Technology Research Center of CSG, Guangzhou 510620, China)

Abstract: The statistical data about the operation reliability indices of the national HVDC transmission projects during the years of 2001 to 2005 and the historical data abroad from 1998 to 2002 are summarized. Through analyzing and comparing among reliability indices of these HVDC projects, the main factors influencing reliabilities of systems and the tendencies of these factors are clarified. Using the resulting information including HVDC projects abroad, the paper then makes a comparison among reliability indices of HVDC projects with two converters per pole and single converter per pole, respectively. The statistical analysis and conclusions are capable of being used as reference to decision making for the operating, planning and management of HVDC projects.

This work is supported by China Southern Power Grid.

Key words: HVDC; reliability; statistical analysis