

国家电网公司直流输电系统可靠性统计与分析

喻新强

(国家电网公司, 北京市 西城区 100031)

Statistics and Analysis on Reliability of HVDC Power Transmission Systems of State Grid Corporation of China

YU Xin-qiang

(State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: Reliability level of HVDC power transmission systems becomes an important factor impacting entire power grid. The author analyzes the reliability of HVDC power transmission systems owned by State Grid Corp. of China since 2003 in respect of forced outage times, forced energy unavailability, scheduled energy unavailability and energy utilization efficiency. Different reliability indices of HVDC power transmission system interact one another, thus to implement the maximization of property benefit of the power grid it is necessary to build a scientific and reasonable reliability evaluation system. The results of analysis on reliability indices of HVDC power transmission systems home and abroad show that the reliability level of HVDC power transmission systems owned by State Power Grid Corp. of China is in the forefront in the world.

KEY WORDS: HVDC power transmission system; reliability; forced outage times; forced energy unavailability; scheduled energy unavailability; energy utilization efficiency

摘要: 直流输电系统的可靠性水平已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素。文章从强迫停运次数、强迫能量不可用率、计划能量不可用率、能量利用率这 4 个方面, 分析了 2003 年以来国家电网公司直流输电系统的可靠性。直流输电系统的各个可靠性指标相互影响, 建立科学合理的可靠性评价体系, 可实现电网资产效益最大化。对比国内外直流输电系统的可靠性指标, 分析得出国家电网公司直流输电系统可靠性水平位居世界前列。

关键词: 直流输电系统; 可靠性; 强迫停运次数; 强迫能量不可用率; 计划能量不可用率; 能量利用率

0 引言

直流输电系统具有的技术、经济优势, 使其在远距离大容量输电、交流系统之间异步互联以及海

底电缆送电等方面发挥着重要作用^[1]。国家电网公司以三峡工程为依托, 实施“一特四大”发展战略, 全面推进直流输电系统建设。目前, 已有 6 个高压直流输电系统投入运行, 送电容量达 12 060 MW, 直流输电线路总长 3 894 km; 在建的直流输电工程有 7 个, 送电容量达 27 350 MW, 直流输电线路总长 7 800 km。国家电网公司直流输电系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 国家电网公司直流输电系统基本情况
Tab. 1 Basic information of the HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China

序号	输电系统	电压等级/kV	输送容量/MW	线路长度/km	投运时间
1	葛南直流输电系统	±500	双极 1 200	1 046	1989-09 1990-08
2	龙政直流输电系统	±500	双极 3 000	860	2003-06
3	江城直流输电系统	±500	双极 3 000	941	2004-06
4	灵宝背靠背换流站	120	360		2005-07
5	宜华直流输电系统	±500	双极 3 000	1 047	2006-12
6	高岭背靠背换流站	±125	双单元 1 500		2008-11
7	向家坝—上海特高压直流输电系统	±800	双极 6 400	1 916	在建
8	锦屏—苏南特高压直流输电系统	±800	双极 7 200	2 090	在建
9	宁东—山东直流输电系统	±660	双极 4 000	1 335	在建
10	德阳—宝鸡直流输电系统	±500	双极 3 000	574	在建
11	呼伦贝尔—辽宁直流输电系统	±500	双极 3 000	908	在建
12	荆门—枫泾直流输电系统	±500	双极 3 000	977	在建
13	灵宝背靠背扩建工程	167	750		在建

随着交直流联网的出现, 直流系统的可靠性水平已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素^[2-3]。直流输电系统可靠性评价指标主要有: 强迫停运次数、强迫能量不可用率、计划能量不可用率、能量利用率等^[4-16]。本文统计了 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统可靠性指标, 并对其可靠性进行分析。

1 强迫停运次数

强迫停运次数代表了直流输电系统安全可控、能控和在控水平的高低，是直流输电系统最重要的可靠性指标。2003—2008年，国家电网公司直流输电系统强迫停运次数统计数据见表2。此间国家电网公司直流输电系统双极强迫停运次数最多3次、最少0次，年平均双极强迫停运次数最多1.5次、最少0.25次；单极强迫停运次数最多8次、最少0次，年平均单极强迫停运次数最多7次、最少2.25次。图1、2所示分别为直流输电系统年平均双、单极强迫停运次数，从中可看出双、单极强迫停运次数呈下降趋势。

表2 2003—2008年国家电网公司
直流输电系统强迫停运次数

Tab. 2 Forced outage times of the HVDC transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

年度	葛南		龙政		江城		宜华		灵宝	年平均 停运次数	
	双极	单极	双极	单极	双极	单极	双极	单极		双极	单极
2003	3	6	0	8						1.50	7.00
2004	1	7	0	7	1	6				0.67	6.67
2005	0	2	1	7	1	6			1	0.67	4.00
2006	1	6	1	1	0	0			2	0.67	2.25
2007	1	6	0	1	0	1	0	7	1	0.25	3.20
2008	0	6	0	4	1	5	0	1	1	0.25	3.40
2008*	0*	6*	0*	4*	1*	1*	0*	1*	1*	0.25*	2.60*

注：*为剔除冰灾影响后的数据。

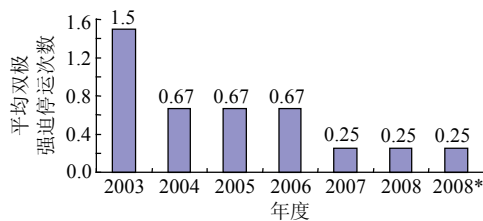


图1 2003—2008年国家电网公司直流输电系统
年平均双极强迫停运次数

Fig. 1 Annual mean of forced bipolar outage times of the HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

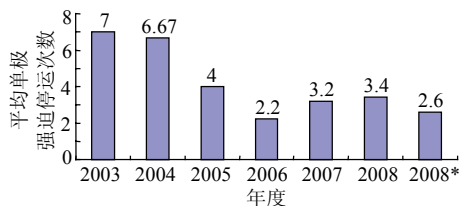


图2 2003—2008年国家电网公司直流输电系统
年平均单极强迫停运次数

Fig. 2 Annual mean of forced monopolar outage times of the HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

龙政、江城和宜华等以输送三峡水电为主的直流输电系统，受三峡来水情况制约，在枯水期，系统基本处于最小功率输送状态，有时甚至处于停备状态；在丰水期，系统长期处于满负荷运行状态，送电压力大，此时如果发生单双极强迫停运，对送电功率影响巨大。因此，跨区电网维护策略为：利用枯水期对直流输电系统进行科学合理、全面彻底的检修维护，确保设备状况优良；在丰水期，保持直流输电系统平稳运行，尽可能减少单极强迫停运次数，杜绝双极强迫停运，减少因直流非计划停运对送受端系统造成的影响。

目前，世界上在运的直流输电系统共百余个，其中容量超过1 000 MW的直流输电系统有29个。为与国外直流输电系统进行可靠性比较，将我国端对端直流输电系统和国外9个容量超过1 000 MW的直流输电系统的强迫停运次数指标进行对比(9个国外直流系统可靠性数据来源于CIGRE公布的2005、2006年数据^[17])，比较结果见表3~6。灵宝背靠背由于额定电压低、功率小，不具备可比性，仅将其指标列于表中相应位置，不参与排序与年平均停运次数计算。

由表3~6可得出：国家电网公司直流输电系统强迫停运次数指标，远远优于国际上其他大容量直流输电系统的指标，葛南、江城、龙政和宜华分别为2005—2008年的第一名，其中，江城于2006年实现零强迫停运，这在世界大容量直流输电系统运行史上也是极为罕见的。2008年的指标虽然受到冰灾的影响，但在国际上仍位列前茅。

表3 2005年直流输电系统强迫停运次数排序

Tab. 3 Sorting of forced outage times of HVDC power transmission systems in 2005

排名	国家	直流输电系统	额定功率/MW	强迫停运次数 (单极+双极)
	中国	灵宝	360	1
1	中国	葛南	1 200	2
2	日本	Kii hannel	1 400	3
3	印度	Rihand-Dadri	1 650	6
4	中国	江城	3 000	7
5	中国	龙政	3 000	8
5	巴西	Itaipu BP2	3 150	8
5	印度	Chandrapur	1 000	8
8	中国	天广	1 800	10
9	中国	贵广 I	3 000	11
9	美国	CU	1 138	11
11	巴西	Itaipu BP1	3 150	17
12	印度	Talcher-Kolar	2 000	32
13	加拿大	Nelson River BP2	2 000	33
14	加拿大	Nelson River BP1	1 855	34
年平均闭锁次数(单极+双极)				13.57

表 4 2006 年直流输电系统强迫停运次数排序
Tab. 4 Sorting of forced outage times of HVDC power transmission systems in 2006

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	强迫停运次数 (单极+双极)
1	中国	江城	3 000	0
2	中国	龙政	3 000	2
	中国	灵宝	360	2
2	日本	Kii hannel	1 400	2
4	美国	CU	1 138	5
5	巴西	Itaipu BP1	3 150	7
6	巴西	Itaipu BP2	3 150	8
7	中国	葛南	1 200	9
8	印度	Chandrapur	1 000	10
9	中国	贵广 I	3 000	11
10	中国	天广	1 800	13
11	印度	Rihand-Dadri	1 650	15
12	印度	Talcher-Kolar	2 000	17
13	加拿大	Nelson River BP1	1 855	36
14	加拿大	Nelson River BP2	2 000	40
年平均闭锁次数(单极+双极)				12.5

表 5 2007 年直流输电系统强迫停运次数排序
Tab. 5 Sorting of forced outage times of HVDC power transmission systems in 2007

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	强迫停运次数 (单极+双极)
1	中国	龙政	3 000	1
1	中国	江城	3 000	1
	中国	灵宝	360	1
3	日本	Kii hannel	1 400	2
4	美国	CU	1 138	5
5	中国	贵广 I	3 000	6
6	中国	葛南	1 200	7
6	中国	宜华	3 000	7
8	巴西	Itaipu BP1	3 150	7
9	巴西	Itaipu BP2	3 150	8
10	印度	Chandrapur	1 000	10
11	中国	天广	1 800	13
12	印度	Rihand-Dadri	1 650	15
13	印度	Talcher-Kolar	2 000	17
14	加拿大	Nelson River BP1	1 855	36
15	加拿大	Nelson River BP2	2 000	40
年平均闭锁次数(单极+双极)				11.67

注：国外指标均为 2006 年数据。

2 强迫能量不可用率

强迫能量不可用率是因强迫停运及降额运行造成的直流输电系统输送能力降低的比率。实际运行中，强迫能量不可用率主要由强迫停运系统的恢复时间以及降压运行时间所决定的。国家电网公司直流输电系统 2003—2008 年强迫能量不可用率统计结果见表 7、8，表 7 为全口径强迫能量不可用率，表 8 为仅考虑换流站原因引起的强迫能量不可用率。

从 2003 年以来，直流输电系统强迫停运次数得到了很好的控制，强迫能量不可用率也呈现出下降趋势，其中 2006 年达最好水平。2007 年宜华处于新投运阶段，设备运行尚未稳定，强迫停运次数

表 6 2008 年直流输电系统强迫停运次数排序
Tab. 6 Sorting of forced outage times of HVDC power transmission systems in 2008

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	强迫停运次数 (单极+双极)
1	中国	宜华	3 000	1
	中国	灵宝	360	1
2	日本	Kii hannel	1 400	2
3	中国	龙政	3 000	4
4	美国	CU	1 138	5
5	中国	葛南	1 200	6
5	中国	江城	3 000	6
5	中国	天广	1 800	6
8	巴西	Itaipu BP1	3 150	7
9	巴西	Itaipu BP2	3 150	8
10	中国	贵广 I	3 000	9
11	印度	Chandrapur	1 000	10
12	印度	Rihand-Dadri	1 650	15
13	中国	贵广 II	3 000	16
14	印度	Talcher-Kolar	2 000	17
15	加拿大	Nelson River BP1	1 855	36
16	加拿大	Nelson River BP2	2 000	40
年平均闭锁次数(单极+双极)				11.75

注：国外指标均为 2006 年数据。

表 7 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统强迫能量不可用率

Tab. 7 Forced energy unavailability of the HVDC power transformation systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

年度	葛南/%	龙政/%	江城/%	宜华/%	灵宝/%	公司加权平均/%
2003	0.46	0.53				0.51
2004	0.48	0.92	2			1.30
2005	0.22	1.26	1.86		0.622	1.30
2006	0.4	0.15	0.7		0.43	0.42
2007	0.7	0.01	1.19	1.49	2.69	0.93
2008	2.13	0.09	1.54	0.82	0.12	0.94
2008*	1.79*	0.09*	0.22*	0.82*	0.12*	0.53

注：*为剔除冰灾影响后的数据。

表 8 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统强迫能量不可用率(仅换流站引起的)

Tab. 8 Forced energy unavailability of HVDC power transformation systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008(induced by station only)

年度	葛南/%	龙政/%	江城/%	宜华/%	公司加权平均/%
2007	0.55	0	0.04	1.34	0.55
2008	1.52	0.07	0.16	0.68	0.44

较多。2008 年，受年初冰灾及葛南设备老化的影响，强迫能量不可用率有所上升，如剔除冰灾影响，该指标较优。

为与国际直流输电系统作可靠性比较，将国内端对端直流输电系统和 CIGRE 发布的 9 个容量超过 1 000 MW 的直流输电系统的强迫能量不可用率进行对比，结果见表 9、10。其中强迫能量不可用率为仅考虑换流站原因引起的强迫能量不可用率。灵宝背靠背工程的指标列于表中相应位置，不参与排序与年平均停运次数计算。

表 9 2007 年直流输电系统强迫能量不可用率排序
Tab. 9 Sorting of forced energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2007

排名	国家	直流输电系统	强迫能量不可用率/%	强迫停运次数
1	中国	龙政	0	1
2	中国	江城	0.04	1
3	美国	CU	0.1	5
4	巴西	Itaipu BP2	0.14	8
5	巴西	Itaipu BP1	0.41	7
6	加拿大	Nelson River BP1	0.51	36
7	中国	葛南	0.55	7
8	加拿大	Nelson River BP2	0.62	40
9	印度	Talcher-Kolar	0.71	17
10	中国	宜华	1.34	7
11	日本	Kii hannel	2.04	2
12	印度	Chandrapur	2.42	10
	中国	灵宝	2.69	1
13	印度	Rihand-Dadri	25.24	15
年加权平均能量不可用率/%			2.08	

注：国外指标均为 2006 年数据。

表 10 2008 年直流输电系统强迫能量不可用率排序
Tab. 10 Sorting of forced energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2008

排名	国家	直流输电系统	强迫能量不可用率/%	强迫停运次数
1	中国	龙政	0.07	4
2	美国	CU	0.1	5
	中国	灵宝	0.12	1
3	巴西	Itaipu BP2	0.14	8
4	中国	江城	0.16	6
5	巴西	Itaipu BP1	0.41	7
6	加拿大	Nelson River BP1	0.51	36
7	加拿大	Nelson River BP2	0.62	40
8	中国	宜华	0.68	1
9	印度	Talcher-Kolar	0.71	17
10	中国	葛南	1.55	6
11	日本	Kii hannel	2.04	2
12	印度	Chandrapur	2.42	10
13	印度	Rihand-Dadri	25.24	12
年加权平均能量不可用率/%			2.07	

注：国外指标均为 2006 年数据。

由表 9、10 可得出，龙政、江城等直流输电系统强迫能量不可用率指标处于国际前列。葛南受设备老化影响、宜华因新设备投运以及冰灾影响，指标处于国际中游水平。

国外直流工程强迫停运次数虽多，但恢复速度很快，对系统的强迫能量不可用率指标影响较小。最典型的是加拿大 Nelson River 和印度 Talcher-Kolar，其中 Nelson River BP1 工程强迫停运 36 次、Nelson River BP2 工程强迫停运 40 次、Talcher-Kolar 工程强迫停运 17 次，但是强迫能量不可用率仅为 0.51%、0.62%、0.71%，平均每次强迫停运后的处理时间仅为 5~7 h。与国外系统相比，在发生相同

次数强迫停运时，国家电网公司直流系统的强迫能量不可用率要高于国外。

建议从以下 3 个方面减少强迫能量不可用率：

1) 加强员工技能培训，熟练掌握故障处理技术，缩短故障处理时间；2) 加强基本操作管理，合理加快现场操作过程；3) 合理辨识降压运行的必要性，进一步提升直流输电运行维护水平。

3 计划能量不可用率

计划能量不可用率是因计划停运造成的直流输电系统输送能力降低的比率，主要包括由年度检修以及日常计划消缺所引起的系统不可用率。国家电网公司计划能量不可用率统计数据如表 11 和图 3 所示。

表 11 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统计划能量不可用率

Tab. 11 Scheduled energy unavailability of the HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

年度	葛南/%	龙政/%	江城/%	宜华/%	灵宝/%	公司加权平均/%
2003	13.44	0.89				4.48
2004	16.98	6.22	1.4			6.01
2005	34.41	3.15	4.25		7.27	8.74
2006	5.22	3.22	3.77		4.97	3.84
2007	8.69	2.93	4.5	6.92	2.83	5.16
2008	2.06	5.15	20.95	13.38	2.12	11.52
2008*	1.76*	3.35*	0.99*	0.18*		1.56*

注：*为剔除冰灾影响后的数据。

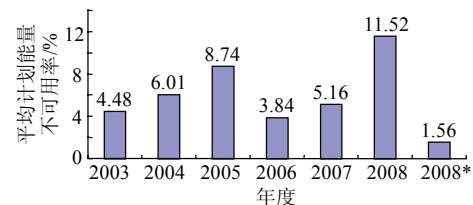


图 3 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统年平均计划能量不可用率

Fig. 3 Annual mean of scheduled energy unavailability of HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

由表 11 可得：2004—2005 年，葛南计划能量不可用率指标较高，这是由该工程实施控制保护系统改造、计划停运时间较长造成的；2006—2007 年系统运行正常，指标趋于稳定；2008 年受冰灾影响，年平均计划不可用率偏高，在剔除冰灾影响后，计划不可用率指标较好。

随着在换流站试点开展状态检修，优化检修策略，提高检修效率，直流输电系统的年度大修时间从 1 月优化为 5~7 d，大大减少了对计划能量不可用率指标的影响。根据目前实施的状态检修策略，

在不遭受特殊自然灾害的情况下,国家电网公司直流输电系统年平均计划能量不可用率可控制在3.5%左右。

为与国际直流输电系统作可靠性比较,将国内端对端直流输电系统和CIGRE发布的9个容量超过1 000 MW的直流输电系统的计划能量不可用率进行对比,结果见表12~15。灵宝背靠背工程的指标列于表中相应位置,不参与排序与年平均指标计算。

由表12~15可得出:国家电网公司直流输电系统的计划能量不可用率指标排名比较靠后。将计划能量不可用率指标与强迫停运次数指标结合起来

表12 2005年直流输电系统计划能量不可用率排序
Tab. 12 Sorting of scheduled energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2005

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	计划能量 不可用率/%
1	印度	Chandrapur	1 000	0.99
2	日本	Kii hannel	1 400	1.14
3	印度	Rihand-Dadri	1 650	1.29
4	印度	Talcher-Kolar	2 000	1.38
5	巴西	Itaipu BP2	3 150	2.32
6	加拿大	Nelson River BP2	2 000	2.79
7	加拿大	Nelson River BP1	1 855	2.83
8	巴西	Itaipu BP1	3 150	3.06
9	中国	龙政	3 000	3.15
10	美国	CU	1 138	3.71
11	中国	江城	3 000	4.25
12	中国	贵广 I	3 000	4.26
13	中国	天广	1 800	5.26
	中国	灵宝	360	7.27
14	中国	葛南	1200	34.41
年平均计划能量不可用率(加权平均)/%				4.27

表13 2006年直流输电系统计划能量不可用率排序
Tab. 13 Sorting of scheduled energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2006

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	计划能量 不可用率/%
1	印度	Chandrapur	1 000	0.3
2	印度	Rihand-Dadri	1 650	0.63
3	印度	Talcher-Kolar	2 000	0.93
4	美国	CU	1 138	1.48
5	加拿大	Nelson River BP2	2 000	1.84
6	巴西	Itaipu BP1	3 150	3
7	巴西	Itaipu BP2	3 150	3.21
8	中国	龙政	3 000	3.22
9	中国	贵广 I	3 000	3.59
10	中国	江城	3 000	3.77
11	加拿大	Nelson River BP1	1 855	4.36
	中国	灵宝	360	4.97
12	中国	葛南	1 200	5.22
13	中国	天广	1 800	5.7
14	日本	Kii hannel	1 400	7.09
年平均计划能量不可用率(加权平均)/%				3.22

表14 2007年直流输电系统计划能量不可用率排序
Tab. 14 Sorting of scheduled energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2007

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	计划能量 不可用率/%
1	印度	Chandrapur	1 000	0.3
2	印度	Rihand-Dadri	1 650	0.63
3	印度	Talcher-Kolar	2 000	0.93
4	美国	CU	1 138	1.48
5	加拿大	Nelson River BP2	2 000	1.84
6	中国	贵广 I	3 000	2.53
	中国	灵宝	360	2.83
7	中国	龙政	3 000	2.93
8	巴西	Itaipu BP1	3 150	3
9	巴西	Itaipu BP2	3 150	3.21
10	加拿大	Nelson River BP1	1 855	4.36
11	中国	江城	3 000	4.5
12	中国	天广	1 800	6.08
13	中国	宜华	3 000	6.92
14	日本	Kii hannel	1 400	7.09
15	中国	葛南	1 200	8.69
年平均计划能量不可用率(加权平均)/%				3.65

注:国外指标均为2006年数据。

表15 2008年直流输电系统计划能量不可用率排序
Tab. 15 Sorting of scheduled energy unavailability of HVDC power transmission systems in 2008

排名	国家	直流输电系统	额定功率/ MW	计划能量 不可用率/%
1	中国	贵广 II	3 000	0.3
1	印度	Chandrapur	1 000	0.3
3	印度	Rihand-Dadri	1 650	0.63
4	印度	Talcher-Kolar	2 000	0.93
5	中国	天广	1 800	1.28
6	美国	CU	1 138	1.48
7	加拿大	Nelson River BP2	2 000	1.84
8	中国	葛南	1 200	2.06
	中国	灵宝	360	2.12
9	巴西	Itaipu BP1	3 150	3
10	巴西	Itaipu BP2	3 150	3.21
11	加拿大	Nelson River BP1	1 855	4.36
12	中国	龙政	3 000	5.15
13	日本	Kii hannel	1 400	7.09
14	中国	宜华	3 000	13.38
15	中国	贵广 I	3 000	19.81
16	中国	江城	3 000	20.95
年平均计划能量不可用率(加权平均)/%				7.29

注:国外指标均为2006年数据。

分析,不难发现:计划能量不可用率指标优良的印度 Chandrapur、印度 Rihand-Dadri、印度 Talcher-Kolar、美国 CU 和加拿大 Nelson River BP2, 2006年强迫停运次数分别为10、15、17、5、40;表6中,除CU排第4名外,其他4个工程基本位于10名以后。因此,计划能量不可用率与强迫停运次数这2个指标在一定程度上成反比关系。充分的检修和维护工作,虽然降低了系统的可用率,但却在一定程度上起着“磨刀不误砍柴工”的作用。

4 能量利用率

能量利用率表征利用直流输电系统实际输送能量的多少。该指标与系统规划以及送电需求相关，国际上各直流输电系统之间的情况各不相同。国家电网公司直流输电系统能量利用率统计结果如表 16 所示。

表 16 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统能量利用率
Tab. 16 Energy Utilization of the HVDC power transmission systems of State Grid Corp. of China during 2003—2008

年度	葛南/%	龙政/%	江城/%	宜华/%	灵宝/%	公司加权平均/%
2003	56.3	60.69				59.44
2004	60.2	78.13	58.73			67.06
2005	58.61	77.41	69.64		73.1	71.14
2006	67.49	63.62	74.36		94.59	69.97
2007	71.96	58.74	68.16	37.09	93.97	57.97
2008	84.23	52.94	54.42	54.3	98.12	58.84

从表 16 得出：灵宝背靠背和葛南的能量利用率较高，2008 年灵宝背靠背能量利用率达 98.12%，几乎全年以额定功率运行。龙政、江城和宜华工程的能量利用率取决于三峡来水以及三峡电力电量分配等限制条件。

5 单双极闭锁原因统计及分析

直流输电系统单双极闭锁原因分为交流及辅助设备、换流阀、控制保护系统、直流场设备、直流线路、其他 6 大类。2003—2008 年，国家电网公司直流输电系统共发生 103 次单双极闭锁，主要集中在直流线路和控制保护系统。图 4 所示为 2003—2008 年单双极闭锁原因，其中直流线路和控制保护系统各占 30%。图 5 所示为 2008 年单双极闭锁原因，直流线路引起的闭锁上升为 44%，这与年初发生的冰灾有直接联系；控制保护系统引起的闭锁下降为 17%，说明经过整治，控制保护系统运行趋于平稳；交流及辅助设备引起的闭锁略有上升，为 17%，与 2008 年发生换流变和 GIS 故障相关。

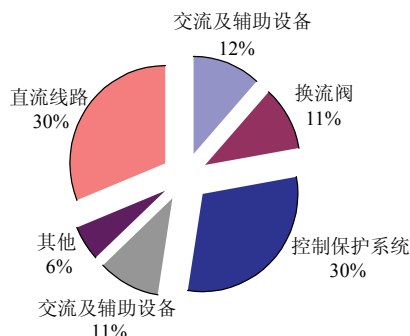


图 4 2003—2008 年国家电网公司直流输电系统单双极闭锁原因
Fig. 4 Cause analysis of the HVDC power transmission systems monopolar blocking and bipolar blocking of State Grid Corp. of China during 2003—2008

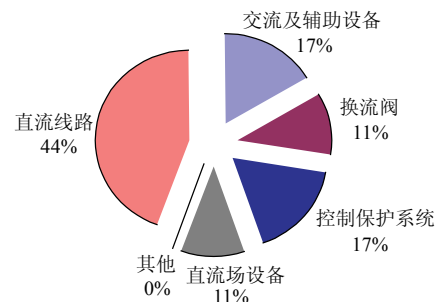


图 5 2008 年国家电网公司直流输电系统单双极闭锁原因分析

Fig. 5 Cause analysis of the HVDC power transmission systems monopolar blocking and bipolar blocking of State Grid Corp. of China in 2008

6 结论

1) 国家电网公司直流输电系统可靠性水平位居世界前列。

2) 从直流输电系统安全可控、能控和在控水平的角度出发，强迫停运次数是所有直流输电系统可靠性指标中最重要的指标。

3) 计划能量不可用率与强迫停运次数之间存在一定的反比例关系，应寻求计划能量不可用率指标与强迫停运次数指标之间的最优关系。

4) 各直流可靠性指标之间并不是孤立的，应针对各直流输电系统在坚强国家电网中的不同作用和地位，科学分析各可靠性指标之间的关系，以实现电网资产效益最大化为原则，建立科学合理的直流输电可靠性评价体系。

5) 通过对历年发生的单双极闭锁故障进行统计和分析，找出存在薄弱环节的设备，对提高系统可靠性提出具体建议。通过循序渐进的采取措施、改进不足，国家电网公司直流输电系统可进一步降低强迫停运次数，提高系统可靠性。

参考文献

- [1] 苏宏田, 齐旭, 吴云. 我国特高压直流输电市场需求[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 1-5.
Su Hongtian, Qi Xu, Wu Yun. Study on market demand of UHVDC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 1-5(in Chinese).
- [2] 周家启, 陈炜骏, 谢开贵, 等. 高压直流输电系统可靠性灵敏度分析模型[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 18-23.
Zhou Jiaqi, Chen Weijun, Xie Kaigui, et al. A sensitivity analysis model of HVDC transmission system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 18-23(in Chinese).
- [3] 刘耀, 王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 51-54, 65.
Liu Yao, Wang Mingxin. Reliability analysis on redundant configuration of protective relays for HVDC power transmission

- system[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 51-54,65(in Chinese).
- [4] 赵成勇, 孙莹, 李广凯. 双馈入直流输电系统中 VSC-HVDC 的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 97-103.
Zhao Chengyong, Sun Ying, Li Guangkai. Control strategy of VSC-HVDC in dual-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 97-103(in Chinese).
- [5] 丁明, 王京景, 宋倩. 基于 k/n(G)模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 32-36,41.
Ding Ming, Wang Jingjing, Song Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based on k-out-of-n:G model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 32-36,41 (in Chinese).
- [6] 王遂, 任震, 蒋金良. 混合法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 42-46.
Wang Sui, Ren Zhen, Jiang Jinliang. Application of hybrid reliability evaluation method for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 42-46(in Chinese).
- [7] 申卫华, 李学鹏, 胡明, 等. 直流输电系统可靠性指标和提高可靠性的措施[J]. 电力建设, 2007, 28(2): 5-10.
Shen Weihua, Li Xuepeng, Hu Ming, et al. DC power transmission system reliability specifications and measures of increasing reliability [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(2): 5-10(in Chinese).
- [8] 陈永进, 任震, 梁振升, 等. 高压直流输电系统可靠性评估的容量模型研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 9-13.
Chen Yongjin, Ren Zhen, Liang Zhensheng, et al. Study on capacity model for reliability evaluation of HVDC system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 9-13(in Chinese).
- [9] 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.
Chen Yongjin, Ren Zhen. Models combination and its application in reliability evaluation for HVDC systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 18-22(in Chinese).
- [10] 王遂, 任震. 高压直流输电系统可靠性影响因素分析[J]. 电力系统自动化学报, 2007, 31(5): 24-28.
Wang Sui, Ren Zhen. Factors influencing reliability of HVDC transmission system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 31(5): 24-28(in Chinese).
- [11] 王鹏. 2007 年全国直流输电系统运行可靠性分析(上)[J]. 电力设备, 2008, 9(8): 84-88.
Wang Peng. Operation reliability analysis for nation-wide HVDC power transmission system in 2007(1)[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(8): 84-88(in Chinese).
- [12] 王鹏. 2007 年全国直流输电系统运行可靠性分析(下)[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 85-88.
Wang Peng. Operation reliability analysis for nation-wide HVDC power transmission system in 2007(2)[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(9): 85-88(in Chinese).
- [13] 朱永虎, 高锡明, 肖遥. 直流输电可靠性管理统计评估系统设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 88-91.
Zhu Yonghu, Gao Ximing, Xiao Yao. Design for reliability management and statistic evaluation system of DC power transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 88-91(in Chinese).
- [14] 刘威, 赵渊, 周家启, 等. 高压直流输电系统单双 12 脉接线可靠性对比研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 29-34.
Liu Wei, Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, et al. Comparison and research on the reliability between the 12-pulse and 2x12-pulse HVDC transmission system[J]. Relay, 2008, 36(9): 29-34(in Chinese).
- [15] 蒋金良, 王遂, 任震. 基于蒙特卡罗法的高压直流输电系统可靠性评估[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 128-132.
Jiang Jinliang, Wang Sui, Ren Zhen. Reliability evaluation of HVDC transmission system based on monte carlo method[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(2): 128-132(in Chinese).
- [16] 马为民, 高理迎, 李亚男, 等. 特高压直流输电系统可靠性和可用率研究[J]. 中国电力, 2007, 40(12): 14-18.
Ma Weimin, Gao Liying, Li Yanan, et al. Study on reliability and availability of a UHVDC transmission system[J]. Electric Power, 2007, 40(12): 14-18(in Chinese).
- [17] Vancers I, Christofersen D J, Leirbukt A, et al. A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 2005-2006[R]. CIGRE Report, 2008.



喻新强

收稿日期: 2009-05-19.

作者简介:

喻新强(1958—), 男, 博士, 教授级高工, 从事电网建设和运行工作, E-mail: xinqiang-yu@sgcc.com.cn.

(见习编辑 蒋毅恒)

IEC 高压直流输电技术委员会 (IEC TC115) 举行首次会议

5月22日下午, 我国第一个自主提出并获准秘书处设在我国的新技术委员会——IEC 高压直流输电技术委员会(IEC TC115)首次会议在京举行。IEC TC115 主席鲍武主持会议并致欢迎词, IEC TC115 秘书、国家电网公司副总经理舒印彪出席会议, 并介绍了高压直流输电技术委员会成立历程。会议讨论通过了本次会议议程, IEC 中央办公室介绍了 IEC 技术工作情况, 宣布 TC115 成立及主席、秘书等人选, 共有来自 9 个国家的 30 余位代表参加会议, 各参与国代表介绍了本国直流输电发展的最新情况。会议还讨论了 IEC 各国国家委员会提出的关于技术委员会名称和工作范围的意见以及战略商务计划文件(SBP)。2008 年 8 月 15 日, 由我国提出的在国际电工委员会(IEC)建立“直流电压 100 kV 以上高压直流输电新技术委员会”的提案获得 IEC 标准化管理局(SMB)批准, 该技术委员会编号为 TC115, 秘书处挂靠在中国。该提案的通过, 标志着我国标准化工作的巨大突破, 对提高我国在国际标准化工作领域的影响力、推动我国自有知识产权的高压直流相关标准转化为国际标准, 具有十分重要的意义。