

DOI: 10.7500/AEPS20130826005

2006—2012 年国家电网公司直流输电系统强迫停运统计分析

梁志峰, 董 昱, 张智刚

(国家电力调度控制中心, 北京市 100031)

摘要: 在中国经济发展和能源分布不平衡的情况下, 直流输电在实现节能减排和资源优化配置中发挥着越来越重要的作用。为不断提高直流输电系统的运行可靠性, 全面掌握国家电网公司直流输电系统运行情况, 以国家电网公司经营区域内的特高压直流、高压直流及背靠背直流输电系统为研究对象, 以直流输电系统实际运行数据为基础, 对强迫停运情况进行统计分析。并从极端天气、设备故障、外力破坏等角度展开讨论, 结合典型故障案例说明国家电网公司直流输电系统面临的安全形势, 分析现有系统的薄弱环节并提出相关建议。

关键词: 直流输电系统; 统计分析; 自然灾害; 故障

0 引言

在中国经济发展和能源资源分布不平衡的情况下, 直流输电系统承担着西电东送和电网互联的重要任务, 为实现节能减排和资源优化配置发挥着越来越重要的作用^[1-3], 提高其可用率和利用率, 减少其强迫停运对电力系统的可靠、经济运行意义重大。随着大批高压直流输电工程的投运, 直流运行的稳定性对电网安全稳定控制的影响日益显著^[4-5]。为全面掌握国家电网公司(以下简称国网公司)直流输电系统强迫停运情况, 本文对 2006—2012 年直流输电系统强迫停运情况进行统计分析, 并从极端天气、设备故障、外力破坏等角度展开讨论, 结合典型故障案例说明近年来国网公司直流输电系统面临的安全形势, 分析现有系统的薄弱环节并提出建议。

1 国网公司在运直流系统概述

截至 2012 年底, 国网公司在运高压直流输电系统已达 14 个, 换流站 25 座, 换流变压器 366 台, 额定输送容量总计 49.424 GW, 直流输电线路总长度为 12 549 km, 详见附录 A 表 A1。在运的直流输电系统中, 高岭背靠背换流站是全球容量最大的背靠背换流站; 灵宝背靠背单元 II 是全球额定电流(4 500 A)最大的直流输电系统之一^[6-8]; 银东直流是全球第 1 个 ±660 kV 电压等级的直流输电系统; 复奉直流、锦苏直流是全球运行电压等级最高的直流输电系统之一, 其中复奉直流是全球输送容量最大、送电距离最远的直流输电系统(2013 年 6 月

18 日完成输送 7 040 MW 过负荷试验); 柴拉直流是全球海拔最高、施工难度最大的直流输电系统。

2 直流输电系统强迫停运情况分析

2.1 直流双极、单极和阀组强迫停运情况统计

2.1.1 双极强迫停运

2006—2012 年间, 国网公司在运的直流输电系统平均双极强迫停运次数总体呈下降趋势, 其间双极强迫停运累计 7 次共 57.4 h, 平均每年每个直流输电系统发生双极强迫停运 0.21 次共 1.7 h, 详见附录 A 表 A2 和表 A3。其中, 2010 年和 2011 年, 直流输电系统运行情况良好, 未发生双极强迫停运; 宜华直流在 2006—2012 年未发生双极强迫停运; 德宝、伊穆、复奉、银东、林枫、柴拉、锦苏直流系统自投运至 2012 年底均未发生双极强迫停运。

2.1.2 单极强迫停运

2006—2012 年, 国网公司在运直流输电系统单极强迫停运累计 105 次共 3 088.8 h, 平均每年每极停运 1.3 次共 37.8 h(含 2008 年冰灾影响)。详见附录 A 表 A4 和表 A5。

直流输电系统单极强迫停运占强迫停运总次数(不含背靠背直流单元强迫停运次数)的 92.1%, 是影响直流输电系统可靠运行的最主要方面。

柴拉、锦苏、银东、龙政直流总体运行情况较好, 单极强迫停运次数和时间较少。运行时间超过 4 年的葛南、江城直流总体运行情况较差, 其中以葛南直流单极平均停运次数最多, 江城直流平均停运时间最长, 除了受 2008 年雨雪冰冻灾害等因素影响外, 设备质量问题也不容忽视, 如 2012 年因换流变压器

设备故障累计停运 698.7 h, 占当年单极强迫停运累计时间的 67.2%。

2.1.3 阀组强迫停运

复奉、锦苏特高压直流采用了双阀组设计, 每极由 2 个阀组串联组成, 单个阀组亦可独立运行, 灵活的运行方式降低了换流站双极、单极强迫停运的发生概率。2011 年复奉直流阀组强迫停运 2 次; 2011 年 5 月 2 日, 复龙换流站极 II 高端阀组因换流

变压器本体油枕左侧气囊爆裂导致强迫停运, 停运时间为 20.6 h; 2011 年 8 月 30 日, 复龙换流站极 I 高端因阀冷主泵流量低跳闸导致强迫停运, 停运时间为 6.3 h。

2.2 双极、单极和阀组强迫停运原因分析

2006—2012 年间, 国网公司在运直流双极、单极和阀组强迫停运累计 114 次共 3 173 h, 详情如表 1 所示。

表 1 2006—2012 年直流输电系统强迫停运原因分析
Table 1 Forced outage reason analysis of HVDC transmission systems of SGCC from 2006 to 2012

故障设备分类		双极		单极		阀组		
		次数	时间/h	次数	时间/h	次数	时间/h	
直流输电线路故障		1	0.5	41	881.73			
交流及其辅助设备	交流控制与保护系统	1	8.2	1	32.77			
	换流变压器			16	1 394.70	1	20.6	
	辅助设备和电源			2	8.23			
	交流开关设备			2	37.95			
换流站设备故障	阀			1	4.93			
	阀设备	阀基设备		3	10.88			
		阀冷却系统			9	178.83	1	6.3
		检测系统						
控制及其保护设备	控制和保护系统			16	108.16			
	通信系统							
直流一次设备	直流滤波器			1	8.97			
	直流平波电抗器			2	192.80			
	直流接地极			1	50.55			
	直流接地线路							
	其他一次设备	4	44.2	8	91.99			
换流站其他设备		1	4.5	2	86.30			
合计		7	57.4	105	3 088.80	2	26.9	

因换流站设备故障导致强迫停运累计 72 次, 占强迫停运总次数的 63.2%。引起强迫停运次数最多的换流站设备是换流变压器、控制和保护系统、直流其他一次设备、阀冷却系统, 分别停运 17, 16, 12, 10 次, 这 4 类系统所导致的强迫停运次数总和占换流站设备故障原因总次数的 76.4%。

因直流输电线路原因导致强迫停运累计 42 次, 占强迫停运总次数的 36.8%。引起直流输电线路强迫停运的原因主要是大风、雷雨、冰雪、山火等恶劣气候和外力因素影响, 线路对树放电和鸟粪闪络导致强迫停运等现象也偶有发生。除 2008 年百年一遇的冰灾导致江城直流线路强迫停运 625 h 外, 导致单极强迫停运时间最长的设备是换流变压器, 累计停运 1 394.7 h, 约占单极强迫停运总时长的 56.6%。平均单次强迫停运时间最长的换流站设备也是换流变压器, 达 83.3 h/次。

2.3 背靠背直流输电系统强迫停运统计

2006—2012 年, 国网公司背靠背直流输电系统

单元强迫停运累计 22 次共 654 h, 平均每年每单元停运 1.4 次共 51.8 h, 详见附录 A 表 A6 和表 A7。

灵宝直流单元 I 和单元 II 在各自投运后的第 1 个完整自然年度强迫停运次数较多, 均达到 4 次, 后期平均单元强迫停运次数呈下降趋势。高岭直流单元 II, III, IV 运行情况较好, 在运行期间, 每个单元的年平均停运次数保持在 1 次以下。黑河直流自投运后, 在统计期间未发生强迫停运。

2.4 背靠背直流输电系统强迫停运原因分析

2006—2012 年国网公司背靠背直流单元强迫停运故障设备分类如表 2 所示。引起背靠背直流输电系统单元强迫停运次数最多的换流站设备是换流变压器、阀冷却系统、控制和保护系统, 均为 4 次。导致单元强迫停运时间最长的换流站设备是换流变压器及控制和保护系统, 分别停运 291.4 h 和 109.2 h。平均单次强迫停运时间最长的换流站设备是换流变压器和直流平波电抗器, 分别停运 72.9 h/次和 34.7 h/次。

表2 2006—2012年背靠背直流单元强迫
停运故障设备统计Table 2 Forced outage failure equipment of back-to-back
DC units of SGCC from 2006 to 2012

	故障设备分类	次数	停运时间/h
交流及其 辅助设备	交流控制与保护系统	1	3.50
	换流变压器	4	291.40
	辅助设备和辅助电源	1	3.40
	交流开关设备	2	24.20
阀设备	阀基设备	1	22.80
	阀冷却系统	4	29.63
控制及其 保护设备	控制和保护系统	4	109.18
直流一 次设备	直流平波电抗器	2	69.30
	其他一次设备	3	100.50

3 直流强迫停运主要问题与典型案例分析

3.1 自然灾害及恶劣天气等影响大

直流输电系统输送距离远,输电廊道地理环境复杂,气候条件恶劣。自然灾害和恶劣天气一直是直流输电系统强迫停运的主要原因,其中以地震和雷雨、大风、冰雪等较为典型^[6-9]。特别是在直流输电通道集中地区,自然灾害和恶劣气候的影响极易导致多回直流同时或相继闭锁故障的发生。以下列举3个典型案例。

1) 典型案例1

2008年初中国南方遭遇特大冰冻雨雪灾害,江城直流1月13日双极线路先后降额运行,17日双极相继闭锁,恢复重建后至3月6日解锁送电。江城直流在3月6日解锁后由于绝缘子在冰灾中损坏出现了多次严重的绝缘子掉串和破损,检查更换绝缘子工作陆续开展至4月份结束。

2) 典型案例2

2007年7月27日晚,葛南直流极Ⅱ、宜华直流极Ⅱ、龙政直流极Ⅱ由于湖北鄂东地区出现雷雨、大风、冰雹等恶劣天气于20:24,20:26,20:38相继闭锁,分别强迫停运1.37,1.33,1.5 h。巡线发现武汉黄陂区的葛南直流极Ⅱ#798号塔、宜华直流极Ⅱ#718号塔、龙政直流极Ⅱ#664号塔有因强风作用导致导线对塔身放电的痕迹。

3) 典型案例3

2008年5月12日14:34,江城直流输电系统江陵站换流阀部分连接线受地震影响偏离原来位置并与带电体靠近放电引起分流,双极阀直流电流差动保护动作导致双极闭锁,强迫停运13.9 h。

3.2 直流换流站深层次隐患依然存在

直流系统的二次及辅助系统远比交流系统要复

杂得多,除了常规的变电站控制功能外,还有站控、极控、阀控、水冷等系统,有50个以上的直流保护功能,一个常规站有4000多块板卡,如果设计不当,任一点故障都可能导致直流闭锁。深层次的隐患主要体现在直流控制保护软件程序存在漏洞、板卡自检功能不完善等。部分直流输电系统的直流、交流控制保护和阀冷却系统等辅助设备的控制保护系统未做到从测量装置、信号传输装置到控制保护装置的全面冗余配置,尤其是投运时间较早的直流系统的测量及保护装置,存在设计不足问题^[10-13],易导致保护装置误动或拒动,对直流系统可靠运行造成影响。部分直流输电系统二次设备与回路等方面的配置和策略存在隐患,导致强迫停运事件时有发生。以下列举2个典型案例。

1) 典型案例1

2009年8月12日20:36和8月13日22:21,葛南直流葛洲坝站2次因中性线电压测量装置异常导致双极闭锁,分别双极强迫停运15.03 h和6.65 h。

2) 典型案例2

2007年2月26日06:28,葛南直流输电系统葛洲坝站因直流控制系统中备用交流滤波器投入时间与交流滤波器电抗器过负荷Ⅰ段动作时间配合不当,使得双极强迫停运8.18 h。

3.3 部分设备质量有待提高

直流输电系统元件的可靠性对直流输电系统可用率影响较大。换流变压器套管等部分一次设备由于质量缺陷导致长时间单极强迫停运;控制和保护系统及通信等二次设备故障造成强迫停运时间较短,但常常导致多次强迫停运。以下列举3个典型案例。

1) 典型案例1

2008年12月21日11:02,葛南直流南桥站极Ⅱ换流变压器套管质量缺陷故障,单极强迫停运252.97 h。2012年1月31日05:34,葛南直流极Ⅰ因南桥站极Ⅰ换流变压器A相分接头处漏油闭锁,单极强迫停运308.7 h。

2) 典型案例2

2007年4月29日00:04,灵宝换流站单元Ⅰ换流变压器阀侧套管损坏,单元强迫停运235.1 h。2012年8月16日03:57,林枫直流因枫泾站极Ⅱ平波电抗器直流线路侧套管炸裂导致极Ⅱ闭锁,单极强迫停运180 h。

3) 典型案例3

2010年10月1日13:18、11月28日08:56和

12月19日03:19,灵宝换流站单元Ⅱ发生3次直流分压器故障导致的强迫停运,停运时间分别为50.53,29.73,0.28 h。

4 相关建议

为不断提高直流输电系统运行可靠性,防止因强迫停运引发电力安全事故,特别是避免通道集中、落点集中情况下多回直流同时或相继闭锁故障的发生,提出以下建议。

1)加强抗灾能力建设,提升恶劣环境下的运行能力。针对局部地区自然灾害和恶劣天气频发等状况,实施差异化设计和改造,综合考虑微地形、小气候等,开展输电通道地区灾害水平的风险评估,有针对性地采取措施,提高直流输电系统整体抗灾能力。加强自然灾害和恶劣天气预测预警工作,制定完善应急预案,加强应急演练,减少设备停运造成的损失。

2)优化系统设计和设备选型监造,从源头上防范强迫停运。加强直流输电系统设计方案论证和比选,结合实际情况适当提高输电通道集中地区、灾害频发地区直流输电系统和设备设施设计标准;注重从测量装置、信号传输装置到控制保护装置全过程采用冗余和多重化配置设计^[14],改进相关控制保护逻辑,强化系统自检功能;优化设计换流变压器等大型设备备用位置、轨道布置,研究安排备用设备迅速就位搬运方案,减少停运时间。严格设备选型,加强工程质量和重要设备监造,做好设备出厂试验、交接验收和安装调试等环节的监督管理,从源头上提高设备设施的产品质量。

3)加强运行维护和检修管理,保证设备安全稳定运行。加强换流变压器等一次设备运行维护管理,掌握设备特性和运行规律,强化状态检修管理,提高在线监测水平,密切跟踪设备状态,及时发现并处理潜在问题和隐患。加强二次设备运行维护,查验直流、交流控制保护系统和阀冷却系统及其他辅助设备的控制保护系统等二次系统保护的配置和策略,查找二次设备、二次回路、保护定值等方面隐患。加强线路走廊和通道清理,加强线路巡查,熟悉掌握当地地形和气候特点,尽早发现异常并及时处置,减少雷雨、大风、冰雪、山火、地震等因素对直流输电系统可靠性的影响。

4)总结运行经验,完善技术标准,加强运检人员技术培训,结合运行实际制定反事故措施,杜绝人为操作失误等原因造成强迫停运。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 刘振亚,张启平.国家电网发展模式研究[J].中国电机工程学报,2013,33(7):1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005:114-116.
- [3] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等.直流输电系统电压等级序列研究[J].中国电机工程学报,2008,28(10):1-8.
LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [4] 舒印彪.中国直流输电的现状 & 展望[J].高电压技术,2004,30(11):1-2.
SHU Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2.
- [5] 张禄琦,周家启,刘洋,等.高压直流输电工程可靠性指标统计分析[J].电力系统自动化,2007,31(19):95-99.
ZHANG Luqi, ZHOU Jiaqi, LIU Yang, et al. Statistical analysis on reliability indices for HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 95-99.
- [6] 喻新强.国家电网公司直流输电系统可靠性统计与分析[J].电网技术,2009,33(12):1-8.
YU Xinqiang. Statistics and analysis on reliability of HVDC power transmission systems of State Grid Corporation of China [J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 1-8.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 梁旭明.换流站单双极闭锁因素辨识及控制手册[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [11] 张志朝,刘茂涛,徐攀腾,等.云广特高压直流输电工程同极双阀组关联因素安全风险分析[J].电力系统自动化,2013,37(7):129-134.
ZHANG Zhichao, LIU Maotao, XU Panteng, et al. Security

risk analysis on interrelated factors between two valve groups in the same pole of Yunnan-Guangdong HVDC transmission project [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 129-134.

[12] 项玲,郑建勇,胡敏强.多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J].电力系统自动化,2005,29(11):29-33.

XIANG Ling, ZHENG Jianyong, HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.

[13] 刘耀,刘翀,曾南超.向-上特高压直流输电工程换流变压器充电失败分析[J].电力系统自动化,2011,35(17):103-106.

LIU Yao, LIU Chong, ZENG Nanchao. Energization failures analysis of Xiang-Shang UHVDC converter transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (17): 103-106.

[14] 胡铭,田杰,曹冬明,等.特高压直流输电控制系统结构配置分析[J].电力系统自动化,2008,32(24):88-92.

HU Ming, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 88-92.

梁志峰(1984—),男,通信作者,工程师,主要研究方向:电网调度运行管理。E-mail: liang-zhifeng@sgcc.com.cn

董 昱(1974—),男,高级工程师,主要研究方向:电网调度运行管理等。

张智刚(1964—),男,高级研究员,主要研究方向:电网调度运行管理等。

(编辑 孔丽蓓)

Statistical Analysis on Forced Outages of HVDC Transmission Systems in State Grid Corporation of China from 2006 to 2012

LIANG Zhifeng, DONG Yu, ZHANG Zhigang

(National Electric Power Dispatching and Control Centre, Beijing 100031, China)

Abstract: Under the condition of unbalanced economic progress and geographical distribution of natural resources in China, high voltage direct current (HVDC) transmission is playing a more and more important role in energy saving, emission reduction, and optimization of resource allocation. To steadily improve the reliability of the operating HVDC systems and provide a full view of the operating HVDC conditions in State Grid Corporation of China (SGCC), this paper takes the HVDC systems, ultra high voltage direct current (UHVDC) systems and back-to-back HVDC systems as the research objects, and a statistical analysis is made of the forced outages using the yearly operation data. An assessment is made of the systems' operating conditions from the perspective of the extreme weather, equipment fault, and external damages. By referring to typical case studies of faults, the security situation the SGCC is in is made clear. The weak links in the systems available are analyzed and relevant suggestions are made.

Key words: high voltage direct current transmission systems; statistical analysis; natural disaster; fault

南瑞集团 20 个项目获 2013 年度中国电力科学技术奖

近日,中国电机工程学会发布了 2013 年度中国电力科学技术奖奖励通报,南瑞集团公司主持或参与的成果获一等奖 3 项、二等奖 4 项、三等奖 13 项。

±800 kV 超大容量特高压直流输电关键技术、设备研制和工程应用,模块化多电平柔性直流输电关键技术研究、装置研制及应用,智能电表关键芯片研发与应用 3 个项目获一等奖。

电动汽车充换电智能化关键技术、成套设备及工程应用,互联大电网协调控制与优化调度关键技术研究与应用,交直流并联大电网安全稳定综合防御系统研究与开发,生物质电站安全经济运行关键技术 4 个项目获二等奖。

适合特高压交直流电网的安全稳定控制技术研究、系统开发及应用,1 000 kV 特高压交流输电系统与环境兼容性评估及工程应用,城市配电网智能化运行控制与管理关键技术研究、核心装备研发及示范应用,“一键式”会计模式研究与应用,超/特高压输变电工程绝缘间隙试验技术研究及工程应用,超/特高压输电线路带电作业关键技术研究、标准制定及推广应用,强背景噪声下的高压电器设备缺陷定位及故障预警技术研究及应用,大电网安全稳定在线防御智能化关键技术研究与应用,国家电网公司电子商务平台,电网运行集约化模式下广域分布式调控一体化关键技术研究与应用,青海电网大规模光伏发电并网规划及运行控制关键技术与应用,电力地理信息系统平台研发与应用,超(超)临界机组国产 DCS 与国产优化软件控制系统的研发与应用共 13 个项目获三等奖。