

直流输电系统强迫停运探讨

朱韬析¹, 李娟², 王超³, 陈为化⁴

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 国网电力科学研究院城乡电网自动化公司, 江苏 南京 210003;
3. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007; 4. 湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 直流输电系统中设置了大量的保护、监视功能,但在确保设备安全的同时,也带来了容易误动的隐患。以天广直流输电系统为例,首先介绍了直流输电系统的强迫停运及可能引起强迫停运的保护监视功能,接着讨论了多年来运行中发生的强迫停运故障原因及故障时对设备的影响,最后综合考虑设备的安全和电网的稳定,对直流输电系统的保护、监视功能提出了改进建议。

关键词: 直流输电; 强迫停运; 保护; 监视

Discussion on forced outages of HVDC transmission system

ZHU Tao-xi¹, LI Juan², WANG Chao³, CHEN Wei-hua⁴

(1. GZ Bureau, C SG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China; 2. Power Automation Research Institute, Nanjin 210003, China; 3. Zhejiang Electric Power Dispath and Communication Center, Hangzhou 310007, China; 4. Hubei Electrical Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: There are many protection and monitoring functions in HVDC transmission system. Although the equipments are completely protected, the mal-operation is very difficult to be avoided. In this paper, based on the experiences of Tian-Guang HVDC transmission system, the forced outage and the protection and monitoring which would cause forced outage are introduced first, then the reason caused forced outages in operation in those years and its effect are analyzed. At last, combined with the safety of equipments and the reliability of power system, the improving suggestion to the protection and monitoring function in HVDC transmission system is discussed.

Key words: HVDC; forced outage; protection; monitoring

中图分类号: TM721.1 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)14-0093-04

0 引言

直流输电具有传送功率大、线路造价低、控制性能好等优点,是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1]。而我国能源分布的不均衡性和经济发展的不平衡性决定了我国能源政策为“西电东送、南北互供、全国联网”,在大规模的西电东送和全国联网工程中,只有直流输电才能解决联网所带来的一系列电网问题,这已得到了目前国内外电力界专家的公认。

近年来,直流输电工程在南方电网蓬勃发展,陆续有天广、高肇、三广、兴安直流输电工程投运,±800 kV 云广直流输电工程也预计在09年建成投运。这些直流输电工程为促进东西部地区资源配置和社会经济发展起到了重要支撑作用,实现了西电东送、东西双赢的战略目标。

但是,直流输电系统相对交流系统,设备更多

也更复杂,这也降低了直流输电系统的可靠性,根据国家电力监管委员会电力可靠性管理中心发布的全国直流输电系统运行可靠性指标统计,2006年全国各直流输电系统共发生了3次双极强迫停运、26次单极强迫停运。直流输电系统的强迫停运,不但可能对逆变侧交流系统造成巨大冲击,还可能导致并列运行的交流输电系统严重过载,直接威胁到电网的稳定和设备的安全。本文以天广直流输电系统为例,首先简单介绍了直流输电系统的强迫停运,然后讨论了可能引起强迫停运的故障,最后结合运行经验根据这些故障的影响讨论了其启动强迫停运的必要性,并依此提出改进建议。

1 直流输电系统强迫停运简介

强迫停运,是一种特殊的直流输电系统停止方式,用于处理各种紧急故障。启动强迫停运后,控制系统会快速增加整流器的触发相位,使其转入逆

变运行状态, 于是平波电抗器和线路电感、电容中存储的能量将迅速回送到交流系统, 直流侧的电压和电流很快下降到零^[1], 以防止故障对设备和电网造成更大的危害。

强迫停运包括闭锁 (block) 和紧急停运 ESOF (Emergency Switch Off) 两种:

(1) 闭锁流程

在整流侧, 启动闭锁以后直接将电流参考值 (I_{ref}) 设为最小值 (0.1 p.u.), 当实际电流低于 0.08 p.u. 后, 移相至 120° ; 随后, 当实际直流电流低于 0.03 p.u., 再移相至 160° ; 实际直流电流低于 0.03 p.u. 并满足 100 ms 的延时后, 停阀的触发脉冲, 从而闭锁换流器。

在逆变侧, 当通讯正常时, 逆变侧接收到保护闭锁以后, 如果检测到整流侧已经闭锁, 当实际直流电流低于 0.03 p.u. 并满足 5 s 的延时后闭锁换流器。

(2) 紧急停运流程^[2]

紧急停运主要用于需要以最快速度隔离交直流系统的严重故障。启动 ESOF 后, 极控停运直流系统, 同时发出跳闸命令断开交流侧断路器。不过, 极控系统里部分后备保护启动的 ESOF 并不需要跳开交流断路器, 只需快速降低直流电流。

在整流侧, 极控系统接收到 ESOF 信号以后, 立即将触发角设为 120° , 强制移相, 使其转入逆变运行状态, 以便将平波电抗器和线路电感、电容中存储的能量迅速回送到交流系统; 此时, 直流电流将迅速下降, 如果实际直流电流小于 0.08 p.u., 则将触发角设为 160° ; 当实际直流电流小于 0.03 p.u. 并满足 10 ms 的延时, 极控将给 VBE 系统发送闭锁触发脉冲的命令, 从而闭锁换流器。

在逆变侧, 接收到 ESOF 后 500 ms 投入旁通对 (如果直流保护系统没有禁止投旁通对), 当实际直流电流小于 0.03 p.u. 并满足 100 ms 的延时后闭锁换流器控制器和阀的触发脉冲。

2 导致直流输电系统强迫停运的因素

可能导致直流输电系统强迫停运的因素很多, 主要有:

2.1 导致闭锁的因素

- (1) 直流保护系统的闭锁请求;
- (2) 直流滤波器保护系统的闭锁请求;
- (3) 对站的闭锁请求;
- (4) 极控后备保护的闭锁请求。

2.2 导致 ESOF 的因素

- (1) 保护启动的 ESOF
直流保护系统的 ESOF 请求;

直流滤波器保护系统的 ESOF 请求;
换流变保护系统的 ESOF 请求;
极控后备保护的 ESOF 请求;
对站的 ESOF 请求。

(2) 监视功能启动的 ESOF

直流站控的 ESOF 请求;
阀冷系统的 ESOF 请求;
阀基电子设备的 ESOF 请求;
极控控制系统均故障;
直流保护系统 1、2 均故障;
火灾报警消防系统的 ESOF 请求;
ESOF 按钮。

3 天广直流输电系统强迫停运统计分析 & 改进建议

3.1 天广直流输电系统强迫停运统计分析

此外, 天广直流输电系统自 2001 年 1 月 25 日极 1 正式投入商业化运行起, 至 5 月 31 日止的 126 天运行期间, 共发生 12 次强迫停运, 其中 3 次为运行人员或试验人员责任、1 次为系统运行调度的责任、8 次为外方设计或设备质量责任^[3]。12 次强迫停运中, 仅有 3 次, 设备的安全确实受到了威胁, 需要停运直流系统。

在 2002 年, 天广直流系统共发生 10 次单极强迫停运、1 次双极强迫停运, 其中 3 次为直流线路故障, 3 次由于直流光电流互感器的缺陷导致, 辅助系统、消防系统和阀冷系统各引起强迫停运 1 次, 极控系统的设计缺陷和换流变保护 KBCH130 误动各 1 次, 以及 1 次人为责任事故^[4]。除线路故障外的强迫停运中, 只有 1 次故障威胁到了设备的安全。

此外, 天广直流输电系统 2005 年以来除线路故障外的强迫停运原因及影响分析如表 1。

综上所述, 天广直流输电系统中设置的保护、监视功能, 虽然有效地保护了设备的安全, 但却不可避免地增大了误动的风险; 而且, 绝大部分强迫停运时, 设备安全并未受到直接威胁, 而整个系统却会遭到严重冲击。

3.2 改进建议

(1) 对保护系统采取合适的闭锁措施

大部分直流保护及极控内的后备保护均通过监视单一的电流 (电压) 量判断是否发生故障, 运行经验证明, 测量元件的异常极易导致保护误动^[8-10]。

直流输电系统的电流和电压联系密切, 发生故障后, 不但导致电流 (电压) 量的异常, 还会同时导致电压 (电流) 量异常。因此, 建议改进这些保

护, 如采取复合电压(电流)闭锁等措施, 尽可能降低测量异常导致保护误动的概率。

(2) 取消监视功能中不必要的强迫停运

如上文所述, 除了保护系统外, 天广直流输电系统中还设置了大量监视阀冷系统、直流控制保护

系统运行状况的监视功能, 但是, 从理论上, 设置的监视功能越多, 其误动的可能性便越高; 而根据上述实际运行经验, 即使是绝大部分监视功能正确动作、启动强迫停运的事故期间, 设备的安全也并未受到直接威胁, 在一定时间内仍然可以维持运行。

表 1 天广直流典型闭锁事件分析

Tab.1 Analysis of the typical block of Tian-Guang HVDC system

时间	原因	动作后果	强迫停运前设备运行所受的影响	处理
2005.04.03	直流站控现场总线系统故障 ^[5]	双极 ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	对直流站控软件进行了针对性修改
2005.06.22	极 1 主泵压力传感器瞬时故障 ^[6]	极 1ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	对极控软件进行了针对性修改
2006.06.23	整流侧交流系统严重故障 ^[7]	双极 ESOF	整流侧 B 型交流滤波器可能承受较大 3 次谐波	对整流侧 B 型交流滤波器进行了改造, 并修改 100 Hz 基频保护延时
2006.07.10	整流侧极 1 直流保护系统 1、2 瞬时故障 ^[7]	极 1ESOF	整流侧 B 型交流滤波器可能承受较大 3 次谐波	后对整流侧 B 型交流滤波器进行了改造
2007.04.29	逆变侧极 1 直流电压测量异常 ^[8、9]	极 1Block	设备和直流输电系统暂未受影响	更换极 1 直流电压光电传感器
2007.06.20	逆变侧极 1 直流电压测量异常	极 1ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	同上
2007.09.11	逆变侧极 1 直流电压测量异常 ^[10]	极 1ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	同上
2007.11.03	220 V 交流窜入 110 V 低压直流系统	双极相继闭锁	设备和直流输电系统暂未受影响	更换故障的 220 V 交流装置
2008.12.12	逆变侧极 2 直流滤波器保护系统 2 SIMADYN D 装置自动重启导致保护误动	极 2ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	更换极 2 直流滤波器保护系统 2 SIMADYN D 装置电源
2008.01.28	逆变侧极 2 直流滤波器保护系统 1 电流采样装置故障	极 2 闭锁	设备和直流输电系统暂未受影响	更换相应的电流采样装置
2008.02.27	逆变侧极 1 阀厅漏水检测装置误动	极 1ESOF	设备和直流输电系统暂未受影响	修理故障的漏水检测装置

随着南方电网调度人员驾驭电网能力的不断提高、运行人员对直流输电核心技术的逐步掌握, 应充分发挥人的主观作用, 对一部分监视功能适当调整, 减小不必要的强迫停运。当设备运行出现异常时, 如果未对设备的安全和系统的稳定造成直接威胁, 建议仅启动告警, 由运行人员采取措施进行初步处理, 同时将异常情况汇报调度人员, 由调度人员对电网运行情况进行相应调整; 之后, 如果设备异常短时间内仍无法消除, 再由运行人员停运直

流系统。通过这样的方法, 将设备异常对系统的不良影响和冲击尽可能地降至最低。

天广直流输电系统自 2001 年 6 月双极投运以来, 积累了大量的运行经验, 而且其双极额定传输功率为 1800 MW, 相对高肇、兴安等直流输电工程较低, 即使发生故障后对系统的不良影响也较低, 因此不妨考虑对天广直流输电系统引起强迫停运的控制保护功能进行适当改进, 通过试运行考察其效果, 为进一步提高直流输电系统可靠性、确保电网

安全稳定运行, 提供有益的参考和宝贵的经验。 初步改进建议如表 2。

表 2 对天广直流保护、监视功能的改进建议

Tab.2 Improving suggestion to protection and monitoring function in Tian-Guang HVDC system

故障类型	原动作后果	修改方式
保护动作	立即启动 ESOF 或 Block	复合电压 (电流) 闭锁功能
直流保护系统 1、2 均故障	立即启动 ESOF	启动告警, 经较长延时后再启动 ESOF
控制保护系统 1、2 均故障	立即启动 ESOF	启动告警, 禁止功率调整, 经较长延时后再启动 ESOF
直流站控的 ESOF 请求	立即启动 ESOF	启动告警, 经较长延时后再启动 ESOF
阀冷系统的 ESOF 请求	立即启动 ESOF	取消膨胀水箱水位偏低、内冷水电导率偏高跳闸功能
阀基电子设备的 ESOF 请求	立即启动 ESOF	取消漏水 II 段跳闸功能
消防系统的 ESOF 请求	已退出该功能	

4 结论

南方电网天广、高肇、兴安直流输电工程核心控制保护部分均由德国 Siemens 公司设计, 从运行经验来看, 有效地保护了设备的安全。但是, 大量的保护、监视功能固然能确保迅速有效地隔离故障, 却不可避免地增大了误动的风险; 而且, 结合天广直流输电工程多年的运行经验, 绝大部分强迫停运时, 设备安全并未受到严重威胁。

目前, 南方电网西电东送主网架呈现“强直流、弱交流”的特点: 直流输电的比例较大, 而与其并联运行的交流系统相对较弱, 直流系统强迫停运时, 可能由于大范围的功率转移引起功角稳定、电压稳定破坏^[7]。所以, 建议对直流输电系统保护、监视功能进行改进, 尽可能避免不必要的强迫停运, 确保系统的安全稳定和输电通道能力的发挥。此外, 还应研究直流输电系统故障情况下交流系统的运行特点, 考虑在交流系统中设置相应的后备保护, 以防止直流输电系统故障且直流保护拒动时, 对交直流系统的设备甚至整个电网的安全稳定造成危害。

天广直流输电工程运行时间较长, 运行经验较丰富, 而且额定传输容量相对较低, 所以不妨考虑对天广直流输电工程做相应改造后进行试验运行, 这样既可以从实际运行中积累宝贵的经验, 又不会对电网造成太大的影响。

参考文献

[1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
 [2] 朱韬析, 邝建荣, 王超. 天广直流输电工程 ESOF 功能简介[J]. 高电压技术, 2006, 32 (增刊): 66-68. ZHU Tao-xi, KUANG Jian-rong, WANG Chao. Introduction of ESOF in Tian-Guang HVDC Transmission Project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (S): 66-68.

[3] 余建国, 晁剑, 钱海. 天广直流输电工程极 1 单极运行强迫停运故障原因分析和改进措施[J]. 电网技术, 2002, 26 (5): 80-83. YU Jian-guo, CHAO Jian, QIAN Hai. Analysis of Forced Outages of Pole 1 in Tian-Guang HVDC Transmission Project Under Single Pole Operation and Its Counter Measures[J]. Power System Technology, 2002, 26 (5): 80-83.
 [4] 王先开, 韩伟强, 林志波, 等. ±500 kV 天广直流系统 2002 年运行分析[J]. 继电器, 2004, 32 (24): 58-62. WANG Xian-kai, HAN Wei-qiang, LIN Zhi-bo, et al. Operation Analysis of ±500 kV Tian-Guang HVDC System in 2002[J]. Relay, 2004, 32 (24): 58-62.
 [5] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术, 2006, 23 (9): 173-175. REN Da-yong. Analysis of Bipole Block Events over the Years of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 23 (9): 173-175.
 [6] 梁家豪, 林睿, 周翔胜. 天广和贵广直流工程中的阀冷控制系统[J]. 高电压技术, 2006, 23 (9): 92-95. LIANG Jia-hao, LIN Rui, ZHOU Xiang-sheng. Valve-cooling Control System Applied in Tian-Guang & Gui-Guang DC Transmission Projects[J]. High Voltage Engineering, 2006, 23 (9): 92-95.
 [7] 张海凤, 朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35 (15): 24-27. ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Influence of Rectifier AC Fault on HVDC[J]. Relay, 2007, 35 (15): 24-27.
 [8] 张海凤, 朱韬析. 天广直流输电系统极 I 电压异常波动原因及其影响分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (23): 102-104. ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Analysis of the Abnormal DC Voltage Fluctuation of the Pole I in the Tian-Guang HVDC Transmission System and Its Negative Influence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 102-104.

(下转第 104 页 continued on page 104)

[3] 顾冠群,吴国新,余勇明,等. 异构网络 MMS 通信系统[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(3): 1-7.
GU Guan-qun, WU Guo-xin, SHE Yong-ming, et al. MMS Communication System in Heterogeneous Network[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995,32(3):1-7.

[4] 章坚民,朱炳铿,赵舫,等. 基于 IEC61850 的变电站子站系统建模与实现[J]. 电力系统自动化, 2004,28(21): 43-48.
ZHANG Jian-min,ZHU Bing-quan,ZHAO Fang,et al. Modeling and Implementation of the Subsystem in Substations Based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(21): 43-48.

[5] 吴在军,胡敏强. 基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003,27(10):62-65.
WU Zai-jun, HU Min-qiang. Research on Substation Automation System Based on IEC61850[J]. Power System Technology, 2003,27(10):62-65.

[6] ISO/IEC 8824-1:1998/Amd2 :2000 ASN.1 Semantic Model [S].

[7] RFC 1006 ISO Transport Services on Top of TCP: Version3[S].

[8] 何轩,夏应清,李祥. 基于以太网的嵌入式 Web 服务器

的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(12): 142-145.
HE Xuan, XIA Ying-qing, LI Xiang. Design and Implementations of Embedded Web Server Based on Ethernet[J]. Microelectronics & Computer, 2005,22(12): 142-145

[9] 顾宁,刘家茂,柴晓路. Web Service 原理与研发实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
GU Ning, LIU Jia-mao, CHAI Xiao-lu. Theory and Development Practice of Web Service [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2008-08-19; 修回日期: 2008-10-14

作者简介:

李友军(1975-), 男, 工程师, 主要从事电力系统自动化的研究开发工作; E-mail:nari_liyj@163.com

徐广辉(1976-), 男, 工程师, 主要研究方向为微机继电保护、数字化变电站技术、IEC61850 及其支撑协议;

王文龙(1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为变电站自动化系统、数字化变电站技术、IEC61850 及其支撑协议。

(上接第 96 页 continued from page 96)

[9] 朱韬析,毛海鹏,欧开健. 天广直流输电系统直流零电流保护动作原因分析[J]. 南方电网技术录用.
ZHU Tao-xi, MAO Hai-peng, OU Kai-jian . Analysis of Action of DC Zero Current Protection in Tian-Guang HVDC Transmission Project[J]. Southern Power System Technology Research (to be Published).

[10] 朱韬析,欧开健. 逆变侧送极控主系统直流电压测量结果影响分析(一) 逆变侧送极控主系统直流电压测量值异常对直流输电系统的影响[J]. 南方电网技术, 2008,2(2):54-57.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of the Influence on HVDC Transmission System of DC Voltage Measurements of Master Pole Control System at the

Inverter Side: Influence on HVDC Transmission System of Abnormal DC Voltage Measurements of Master Pole Control System at the Inverter Side[J]. Southern Power System Technology Research, 2008,2(2):54-57.

收稿日期: 2008-08-29; 修回日期: 2008-12-18

作者简介:

朱韬析(1980-), 男, 硕士, 工程师, 目前从事直流输电运行维护工作. E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

李娟(1979-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护;

王超(1981-), 男, 博士, 从事电力系统可靠性, 电网安全运行, 特高压输电等方面的研究。

(上接第 100 页 continued from page 100)

[5] ZHANG Yong-jun, CHEN Chao, LIAO Ming-chuan. Study on LV and MV Integrated Reactive Power Optimization in Distribution Networks[A]. in:2008 China International Conference on Electricity Distribution, CIGRE[C]. Guangzhou(China):2008.

[6] 赖斯,张勇军,廖民传,等. 文昌配电网节能降耗综合治理方案研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 42-45.
LAI Si, ZHANG Yong-jun, LIAO Min-chuan, et al. Study on Energy Saving Project for Wenchang Distribution Network[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 42-45.

[7] 丁晓群,王宽,王斌. 主馈线和分支线路相结合的配电网无功补偿[J]. 电力自动化设备,2006, 26(4): 11-14.
DING Xiao-qun, WANG Kuan, WANG Bin. Distribution Network Var Compensation Considering Both Feeder and Branches[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,

26(4): 11-14.

[8] 袁智强. 降低网损的无功补偿方案研究[J]. 供用电, 2008, 25(3): 73-77.
YUAN Zhi-qiang. Study on the Scheme of Reactive Power Compensation with Loss Reduced[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(3): 73-77.

[9] 李顺宗,李立,祁渭辉. 配电变压器的节能开发与节能改造[J]. 供用电, 2008, 25(1): 65-66, 73.
LI Shun-zong, LI Li, QI Wei-hui. Energy-Saving Development and Transformation of Distribution Transformers[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(1): 65-66,73.

收稿日期: 2009-04-10; 修回日期: 2009-04-23

作者简介:

李鹏(1976-), 男, 工程师, 主要从事配网规划与管理的工作. E-mail:zhangjun@scut.edu.cn