

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.033

兴—安直流低负荷无功优化功能运行分析

雷鸣东, 杨跃辉, 杨钦泽, 童 凯, 杨明权, 林志明

(中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400)

摘要: 南方电网的西电东送主干网架已经形成了“八交八直”的复杂网络,低负荷、枯水期交流系统调压困难是目前电网运行面临的严峻问题,低负荷无功优化功能作为直流控制系统中的一种调压方式,有利于提高特殊时段换流站及周边厂站的交流母线电压的调控能力。文中对兴安直流低负荷无功优化功能投运两年来的运行情况和经济性进行全面的总结和分析,并针对存在的问题提出了改进和控制措施。

关键词: 兴安直流; 低负荷无功优化(LLPRO); 无功功率; 无功功率平衡; 电压

Operation Analysis of Xing-An HVDC Low Load Reactive Power Optimization Function

LEI Mingdong, YANG Yuehui, YANG Qinze, TONG Kai, YANG Mingquan, LIN Zhiming

(CSG EHV Transmission Companies Tianshengqiao Bureau, Guizhou Xingyi 562400, China)

Abstract: The ‘power transmission from west to east’ backbone network of China Southern Power Grid (CSG) forms a complex network of eight HVDC systems and eight AC systems. Low load and weak AC voltage adjustability in low water period are of the difficulty faced by the power grid. Low load reactive power optimization(LLPRO) function, as a voltage adjustment mode of the DC control system, can enhance the voltage control ability of the AC buses in converter station and its peripheral substations in some special periods of time. In this paper, the Xing-An HVDC LLRPO function, which has been put into operation for two year, is comprehensively analyzed and summarized, and some countermeasures against the existing problems are offered.

Key words: Xing-An HVDC; low load reactive power optimization(LLPRO); reactive power; balance of reactive power; voltage

0 引言

高压直流输电工程主要远距离、大功率输电工程,同时也可以作为大区域电网的联络工程。随着西电东送工程的日益扩大,目前南方电网的西电东送主干网架已经形成了“八交八直”的复杂网络,其中包括 6 条高压直流输电和 2 条特高压输电工程。

换流器对于交流系统而言是一个谐波源,同时吸收一定的无功,需要在换流站内配置一定数量的交流滤波器,为换流器提供无功和滤除谐波^[1-5]。在换流器解锁后,至少要投入 1A+1B 的交流滤波器,在直流低负荷期间,将造成换流站交流滤波器提供的无功功率过剩,向交流系统提供无功功率,这将导

致换流站附近厂站的母线电压升高^[6-9]。

兴仁换流站为兴—安直流起点站,与之相连大部分线路未安装高抗,并且厂站无低抗,加上在低谷期间附近水电厂停机调峰、火电厂开机方式较小时受工况影响,而进相深度有限导致调压困难,造成枯水期、低谷阶段兴仁站交流母线电压持续较高,甚至有电压越限的风险,影响直流系统的正常运行^[10-16]。低负荷无功优化功能(low load reactive power optimization, LLPRO 功能)是直流控制系统针对低负荷期间无功过剩而设计的一种控制策略,换流器自身吸收多余无功,维持换流站与交流系统的无功功率平衡,丰富调压手段^[17]。实际运行经验表明,自 2012 年 5 月,兴—安直流低负荷无功优化功能投入后,兴仁站在低谷阶段母线电压得到了较大的改善。

收稿日期:2015-11-22; 修回日期:2015-12-19

1 低负荷无功优化功能基本原理

由换流原理知道,整流站的换流器吸收的无功^[4-5]

$$Q_c = p_{dc} \tan \varphi_1 \quad (1)$$

整流站换流器的功率因素

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (2)$$

式(2)中: α 为换流器的触发角; γ 为换流器的换相角。

结合式(1)、(2)可以看出,在输送有功功率不变的情况下,减小换流器功率因素,就可使换流器吸收更多的无功,而减小换流器的功率因素的主要途径是通过改变换流器的触发角来实现。LLPRO 功能是基于直流系统在低负荷时,通过提高触发角,使换流站在换相过程中吸收更多的无功,减少注入交流系统的无功,维持换流站与交流系统的无功功率平衡,降低交流系统的电压^[18-22]。

按照兴—安直流设计要求,双极最低负荷 300 MW 运行,LLRPO 功能未投入时,换流器将吸收无功约 103 Mvar,直流系统按照最小滤波器要求,投入 1A+1B 交流滤波器,两组交流滤波器最多可以提供无功功率 308 Mvar,从而造成 205 Mvar 的无功功率输入交流系统,抬高了交流母线的电压。同理,当单极最小功率 150 MW 运行时,换流器吸收的无功降低,将有更多的无功过剩。当 LLPRO 功能投入后,直流电压、系统交换无功随直流功率变化见图 1。在双极最低负荷 300 MW 运行时,LLRPO 功能被激活,直流电压变为 338 kV,与系统交换无功为 47 Mvar,从而使交流母线电压稳定。

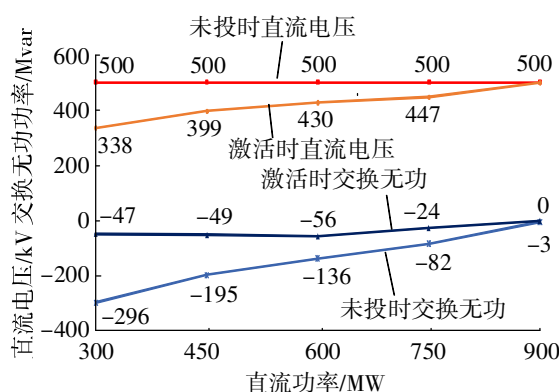


图 1 LLRPO 投入前、后直流功率、直流电压和交换无功的关系曲线

Fig. 1 The DC power, voltage parameters and exchanging reactive trend for LLRPO function input before and after

兴—安直流 LLPRO 功能需要在站间通信正常,系统级下整流站、逆变站同时满足以下条件后方可在主控站投入该功能:

- 1)换流变分接头控制为自动模式和角度模式;
- 2)换流变接头无异步;
- 3)所有换流变分体本身无故障。

以上任意一条条件不满足时就会导致该功能自动退出。

2 运行情况分析

兴—安直流 LLPRO 功能自 2012 年 5 月正式投入运行后,虽然兴仁站交流母线电压得到一定的改善,但在运行过程也出现了一些异常情况,下面对运行中出现的异常情况进行详细分析。

2.1 直流降压运行转为全压运行时,造成直流功率受限

为了避免原西门子极控逻辑中出现的 LLRPO 功能激活信号在临界点频繁投退的现象,2011 年 8 月,对兴—安直流低负荷无功优化功能进行修改,采用电压斜率发生器产生的电压值替代直接从功率电压曲线产生的电压值,使得 LLRPO 功能的激活信号待实际直流电压上升至当前直流电压参考值时再退出,逻辑修改后的运行情况见表 1。由表 1 可见,LLPRO 功能投入后,激活时必须同时满足:①极在解锁状态;②站间通信正常;③低负荷无功优化功能可用;④直流电压在上升变化中或者直流功率低于 750 MW。综上所述,正常运行时当直流电压在上升变化中或者是双极直流功率低于 750 MW 时,二者满足其一,LLRPO 功能将变为激活状态。

由表 1 可以看出,兴—安直流低负荷无功优化功能在双极功率 900 MW 以下即开始调整直流电压,但此时直流保护界面显示该功能仅为 Enable 状态,而不是 Active 状态。当兴—安直流双极负荷降低到 750 MW 以下时,直流保护界面中显示低负荷无功优化功能状态由 Enable 转为 Active。结合兴—安直流 LLPRO 功能当前的运行情况,在每次直流线路故障降压重启成功或者手动设置为降压运行方式,由降压运行方式向正常电压运行方式转变时,由于电压发生上升变化,按照现有的 LLPRO 功能激活逻辑,不管当时直流功率是否达到 LLPRO 功能激活值,当下达恢复全压运行的命令的同时 LLPRO 功能都将变为 Active 状态。此时,由于降压运行时换流器吸收的无功增加和产生大量的谐波,这就要求投入更多的交流滤波器,而 LLPRO 功能激活后,按照该功能的无功控制策略,将切除多余交流滤波器,造成交流滤波频繁投切,而交流滤波器退出后需要 5 min 的放电时间后方可再次投入运行,因此,在大负荷期间,LLRPO 功能投入时进行降压恢复全压的

表 1 LLRPO 功能逻辑修改后的不同功率下的直流运行情况

Table 1 The run states of different DC power after LLRPO function was modified

直流功率/MW	极一换流器 吸收无功/Mvar	极二换流器吸 收无功/Mvar	极一直流 电压/kV	极二直流 电压/kV	滤波器 投入组数	交流滤波器提 供总无功/Mvar	交流母 线电压/kV	LLRPO
300	135	135	+340	-338	A+B	297	536	Active
350	140	139	+360	-358	A+B	297	536	Active
450	129	131	+400	-398	A+B	295	535	Active
500	130	131	+412	-409	A+B	295	535	Active
600	121	123	+432	-430	A+B	295	535	Active
700	127	119	+443	-441	A+B	296	535	Active
750	134	137	+451	-446	A+B	295	535	Enable
800	133	121	+467	-465	A+B	294	534	Enable
900	141	143	+500	-500	A+B	295	535	Enable

注：兴—安直流低负荷无功优化功能在工作站直流保护界面中共有 3 种状态：Disable（功能退出）、Enable（功能投入）和 Active（功能激活）。

操作，造成了直流负荷受限的情况出现。

2.2 交流滤波器误投切

在调试过程中，以 200 MW/min 直流功率变化率将兴—安直流功率由 300 MW 上升至 750 MW 的过程中，宝安站、兴仁站均出现交流滤波器多投一组，稳定后又自动切除的情况。经分析为直流功率上升率设置过大，由于直流功率调节较快，使得交换的无功功率处于投入的临界状态，短时造成无功越限，从而造成滤波器投入。直流功率稳定在 750 MW 后，低负荷无功优化功能激活状态消失，电压升高，直流系统消耗的无功减少，无功功率因多投一组而越限，因此，再次自动切除一组滤波器。由于交流滤波器的投切存在固有放电时间，这样将导致多组交流滤波器在短时间不可用，导致交流站控发出禁止投切滤波器信号，限制直流功率的情况出现，将变化率设为 100 MW/min 重新试验时，未出现上述现象。

2.3 解锁逻辑发生改变

在兴—安直流的解锁逻辑中，控制系统将按照设定的电压进行建压，当 LLPRO 功能投入后，系统选择的电压为 LLPRO 功能激活的最低值，即 338 kV。当一极正常运行，功率大于双极运行时的 LLPRO 功能激活值时，另一极在解锁后由于电压为 338 kV，LLPRO 功能将激活，随着极间功率转移，解锁极恢复至正常电压需要一个缓慢的过程，不利于快速调整运行方式。

2.4 换流变分接头失步与 LLRPO 功能自动退出情况增加

在兴仁换流站，每个极有 6 台换流变，正常运行是需要 6 台换流变保持同一分接头档位，分接头每调节一档电机需要转动 33 圈，在调节过程可能产生机械误差，导致分接头瞬时失步，无延时将失步信号

传至极控系统。前文提到，只要任一站的分接头失步将导致 LLPRO 功能自动退出运行，有时该功能能够自动投入，有时又不能自动投入，需手动投入，这也是该功能投入运行后常见的异常情况。经过分析得出：当兴仁站分接头失步和 LLRPO 退出信号同时出现，对站未收到兴仁站通过站间通信传送的退出信号时，兴仁站分接头失步信号已消失，LLRPO 功能将自动恢复，反之，两站的 LLRPO 功能将变为 Disabled 状态。表 2 为近 4 年来双极换流变出现的分接头失步信号次数。

表 2 近 4 年来双极换流变出现的分接头失步信号次数

Table 2 In the past four years bipolar converter transformer for tap appeared out of step signal number

时间	极 1 换流变/次	极 2 换流变/次
2013-05-17—2014-05-17	40	112
2012-05-17—2013-05-17	136	129
2011-05-17—2012-05-17	25	81
2010-05-17—2011-05-17	4	15

通过表 2 可以看出，LLRPO 功能未投入之前，换流变分接头失步信号出现次数较少。自 2012 年 05 月投入该功能后，分接头失步信号明显增多，2013 年 10 月开始，由于该功能的诸多异常情况，LLRPO 功能现场运行人员按照母线电压和直流功率等情况自行投退后，分接头失步信号出现次数减少。

2.5 增加换流变分接头动作次数

当换流器的触发角提高后，由于控制系统的调节作用，将提升换流变分接头档位以降低触发角，因此，兴—安直流 LLPRO 功能激活后，换流变分接头将升至最高档位 18 档。正常情况下，该功能投入后，根据直流系统运行工况自行激活，在负荷低谷阶段，分接头动作次数与正常情况相比差别不大，当负荷

曲线处于 LLPRO 激活临界点时波动时,将增加换流变分接头的动作次数;同时,结合换流变失步信号增加的情况,可以看出该功能投入后,短时间换流变分接头动作次数增加很多,从而可能缩短换流变分接头的寿命,加维护成本。

3 建议和改进措施

3.1 完善软件逻辑

针对兴—安直流 LLRPO 功能存在的问题,对极控软件逻辑进行以下修改:

1)在 LLPRO 功能退出的逻辑中增加延时模块,躲过由于机械误差造成的分接头瞬时失步而导致该功能退出;

2)修改 LLPRO 功能激活逻辑,引入当前直流功率作为判据之一。防止直流系统从降压运行方式向正常电压方式转换过程中,无论直流功率在是否达到 LLPRO 功能激活值,而自行变为 Active 状态,从而导致无功控制方式发生转变,使交流滤波器频繁投切乃至限制直流功率。建议现场未对逻辑进行修改之前,在运行方式从降压恢复全压操作之前,退出 LLRPO 功能;

3)2012 年新修改后的 LLRPO 功能激活逻辑,未考虑到降压重启的电压改变与低负荷限压的电压改变的区别,建议增加限制逻辑。在降压功能启动时,判断当前低负荷限压与降压的结果大小,只有当低负荷限压结果低于降压结果时才使 LLRPO 功能激活信号出口。

由于直流极控系统的控制逻辑复杂,逻辑功能的改动有可能引起其他控制的变化,以上建议还需要进一步进行仿真试验验证和试运行后,方能实施。

3.2 根据交流母线电压运行情况,手动投退 LLPRO 功能

将 LLPRO 功能作为系统调压的后备方式,正常情况采用手动方式,当换流站交流母线电压超过运行方式要求范围且双极直流功率较低时,优先考虑换流站周边厂站的调压手段,当周边厂站的调压手段已用尽后再投入 LLPRO 功能,降低直流系统的运营成本,同时可以避免在一极正常运行时,解锁另一极出现 LLPRO 功能激活的情况。

3.3 将兴—安直流由降压运行恢复全压运行之前,手动退出 LLPRO 功能

鉴于文中分析出兴—安直流由降压运行恢复全压运行时,由于逻辑不完善,导致 LLRPO 功能误激活,引起功率受限的情况,建议在新的激活逻辑未完善之前,将兴—安直流由降压运行操作至全压运行

时,提前退出 LLRPO 功能,待电压恢复全压后,再投入 LLRPO 功能。

3.4 功率手动调整时设置合理功率变化率

在枯水期低谷阶段,兴—安直流 LLPRO 功能投入并处于激活状态时,出现系统内其他线路跳闸需要兴—安直流快速提升功率时,设置的功率变化率不宜大于 100 MW/min 或者在此期间先退出 LLRPO 功能,然后再手动调整功率。

4 结语

文中以兴仁换流站为背景,对兴—安直流 LLPRO 功能投运以来的出现的异常情况进行了全面总结分析,提出了存在 LLRPO 功能频繁投退、误投交流滤波器、直流解锁过程变化以及与兴—安直流降压运行配合不协调等问题。结合实际情况,提出完善控制逻辑的建议,以及适时投退 LLPRO 功能和合理设置功率变化率等改进控制措施。

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:电力工业出版社,1982.
HVDC Research Rroup of Zhejiang University. DC transmission[M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982.
- [2] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电无功管理的原则与算法[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):85-88.
WANG Feng,XU Zheng,HUANG Ying,et al. Principle and algorithms of reactive power management for HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(4): 85-88.
- [3] 肖鸣,傅闯. 云广±800 kV 直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 南方电网技术,2010,4(4):44-47.
XIAO Ming,FU Chuang. Analysis of Yunnan-Guangdong ±800 kV DC system operation enabling its low load reactive power optimization function[J]. Southern Power System Technology,2010,4(4): 44-47.
- [4] 肖鸣,傅闯,梁志飞. 高压直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(15):91-95.
XIAO Ming,FU Chuang,LIANG Zhifei. An operation analysis of HVDC low load reactive power optimization function[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(15): 91-95.
- [5] 宋述波,袁鹏,吴宏波. 贵广直流系统无功功率控制小结[J]. 继电器,2007,35(11):69-71.
SONG Shubo,YUAN Peng,WU Hongbo. Summary of the reactive power's control in GuiGuang HVDC [J]. Relay, 2007,35(11): 69-71.
- [6] 殷威扬,杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术,2006,32(9):50-54.

- YAN Weiyang, YANG Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50-54.
- [7] 汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30-34.
- WANG Juanjuan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Survey of studies on transient voltage stability of AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 30-34.
- [8] 刘崇茹, 张伯明. 直流输电系统控制参数对交直流连接母线电压幅值的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 23-27.
- LIU Chongru, ZHANG Boming. Influence of DC control parameters on joint buses of AC/DC hybrid power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 23-27.
- [9] 颜伟, 张海兵, 田甜, 等. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 43-46.
- YAN Wei, ZHANG Haibing, TIAN Tian, et al. Dynamic reactive power optimization of AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 43-46.
- [10] 李勇, 罗隆福, 尚荣艳, 等. 新型直流输电系统阀侧绕组无功补偿特性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 52-55.
- LI Yong, LUO Longfu, SHANG Rongyan, et al. Characteristics of reactive power compensation of valve winding of a novel DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 52-55.
- [11] 彭磊, 吴耀武, 熊信银, 等. 交直流混合输电系统的无功优化[J]. 继电器, 2006, 34(4): 35-39.
- PENG Lei, WU Yaowu, XIONG Xinyin, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system[J]. Relay, 2006, 34(4): 35-39.
- [12] 黄志岭, 黄晓明, 陈炜, 等. 芦嵛直流无功优化方案仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 65-69.
- HUANG Zhiling, HUANG Xiaoming, CHEN Hui, et al. Simulation study on Lu-Sheng HVDC reactive power optimization scheme[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 65-69.
- [13] 李罗, 雷颖, 魏玲燕, 等. 配电用复合无功功率补偿装置原理分析及试验方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 107-111.
- LI Luo, LEI Ying, WEI Lingyan, et al. Principle analyze and test method of complex reactive power compensation equipment for power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 107-111.
- [14] 陈亦平. 直流系统无功控制对交流系统电压调整的影响分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(6): 11-13.
- CHEN Yiping. Analysis of the influence of HVDC reactive power control on the voltage regulation of AC system[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2005, 1(6): 11-13.
- [15] Siemens. Yunnan—Guangdong line UHVDC transmission project C/P design specification[R]. Germany: Siemens, 2009.
- [16] 姚李孝, 肖靓, 王磊, 等. 基于改进遗传算法的配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 24-28.
- YAO Lixiao, XIAO Jing, WANG Lei, et al. Reactive power optimization based on improved genetic algorithms in distribution system[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2009, 25(4): 24-28.
- [17] 张兴宏. 变电站电压无功综合控制策略研究[J]. 科技资讯, 2008(36): 250-250.
- ZHANG Xinghong. Reactive power integrated control strategy for substation voltage of[J]. Science & Technology Information, 2008(36): 250-250.
- [18] 顾晓亮. 变电站电压无功控制应用研究[J]. 大众科技, 2004(7): 29-30.
- GU Xiaoliang. Study on the applying technology of voltage and reactive power control in substation[J]. Tsinghua Science and Technology, 2004(7): 29-30.
- [19] 余海霞, 郭中华. 关于变电站电压/无功控制的研究[J]. 科技风, 2011(19): 146.
- YU Haixia, GUO Zhonghua. On substation voltage/var control research on[J]. Technology Wind, 2011(19): 146.
- [20] 朱光云. 浅谈无功电压优化控制策略[J]. 广东科技, 2009(16): 169-171.
- ZHU Guangyun. Discussion on the optimal reactive power and voltage control strategy of[J]. Guangdong Science & Technology, 2009(16): 169-171.
- [21] 杨贵军, 卢海颖. 兴安直流工程直流滤波电容器组不平衡保护[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 77-80.
- YANG Guijun, LU Haiying. Imbalance protection of DC filter capacitor bank in xingan HVDC project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 77-80.
- [22] 戴甲水, 杨跃辉. 兴仁换流站交流滤波器开关 POW 装置运行情况分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 73-76.
- DAI Jiashui, YANG Yuehui. Operation analysis for POW device of AC filter switch at xingren converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 73-76.
- 雷鸣东(1986—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电运行维护工作。
- 杨跃辉(1983—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电运行维护工作。
- 杨钦泽(1986—), 男, 助理工程师, 主要从事高压直流输电运行维护工作。