

# HVDC 送端孤岛运行方式的附加控制策略

马玉龙, 石岩, 殷威扬, 杨志栋

(北京网联直流工程技术有限公司, 北京市东城区 100005)

## Additional Control Strategy for Islanded AC System at Sending Terminal of HVDC

MA Yu-long, SHI Yan, YIN Wei-yang, YANG Zhi-dong

(Beijing Wanglian HVDC Engineering Technology Co. Ltd., Dongcheng District, Beijing 100005, China)

**ABSTRACT:** When HVDC project is used for the power transmission from large hydropower station or thermal power plant located far away from the main power grids, the AC power system at sending end falls into an islanded system. In the circumstance, the conventional control mode of constant power or current may cause persistent power unbalance in the grid while the AC system is disturbed, and then leads to the instability of AC and DC systems. The authors propose an additional control strategy, which changes the power or current order according to the variation of system frequency, thus the power balance of the grid can be implemented. To verify the proposed control strategy, real-time digital simulator is adopted. Simulation results show that the proposed additional control strategy can evidently enhance the stability of power grid.

**KEY WORDS:** HVDC; islanded system; additional control; RTDS

**摘要:** 直流工程用于远离主干网架的水电站或火电厂的电力送出时, 送端交流系统形成相对独立的“孤岛”。在这种运行方式下, 在交流系统有扰动时常规定功率或定电流控制方式有可能引起系统功率的持续不平衡, 进而导致交、直流系统稳定运行的破坏。提出了一种附加控制策略, 该附加控制策略根据系统频率的变化改变直流系统的功率或电流指令, 从而实现系统功率的平衡。采用实时数字仿真器对该附加控制策略进行了验证, 仿真结果表明, 该附加控制策略可以明显增强系统的稳定性。

**关键词:** 高压直流输电; 孤岛系统; 附加控制; 实时数字仿真器

## 0 引言

HVDC 必须借助交流系统完成换相, 当交流系统较弱时会引起诸多问题<sup>[1-12]</sup>。一般认为, 受端交流系统较弱时会造成逆变器换相困难, 但实际上, 送端交流系统较弱时也有问题。对于远离主干网

架的大型水电厂或火电厂, 如果采用高压直流输电(HVDC)的方式, 送端电网的若干台发电机有可能与换流母线组网运行, 形成“孤岛”<sup>[13-14]</sup>。在这种运行方式下, 在交流系统有扰动时常规定功率或定电流控制方式有可能引起系统功率的持续不平衡, 进而导致交、直流系统稳定运行的破坏。规划中的呼伦贝尔煤电基地及其高压直流输电工程<sup>[6]</sup>是一个典型的送端孤岛电网。

本文以该基地为例, 详细分析了送端电网孤岛运行方式存在的问题, 给出整流侧的附加控制策略并在实时数字仿真器(real time digital simulator, RTDS)<sup>[15]</sup>上进行了验证。

## 1 送端电网孤岛运行方式存在的问题

按照规划, 呼伦贝尔煤电基地将建设伊敏电厂(2 200 MW)、呼伦贝尔一厂(1 200 MW)、呼伦贝尔二厂(1 200 MW)、呼伦贝尔三厂(1 200 MW)等大型火力发电厂。呼伦贝尔—辽宁直流工程设计容量 3 000 MW, 额定电压 500 kV, 直流输电距离 913 km, 是呼伦贝尔地区电力外送的重要通道, 其地理接线如图 1 所示。正常运行方式下, 伊敏电厂一、二期

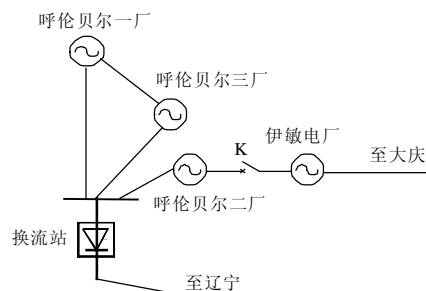


图 1 呼伦贝尔—辽宁直流工程送端电网  
Fig.1 The sending end of Hulunbeier-Liaoning HVDC project

工程 500kV 母线与呼伦贝尔二厂母线相联,即伊敏电厂一、二期工程通过呼伦贝尔二厂与呼伦贝尔换流站交流母线间接相联。此时,呼伦贝尔—辽宁直流工程的换流站交流母线与东北电网的主网架存在电气连接关系。如果伊敏电厂的 500kV 母线与呼伦贝尔二厂的交流联络线断开(即图 1 中的开关 K 断开),呼伦贝尔—辽宁直流工程的送端交流系统将只包括呼伦贝尔一厂、二厂、三厂的 6 台发电机,形成电气关系上的“孤岛”。

在孤岛运行方式下,直流系统输送功率较大时,系统的短路比较小,属于弱交流系统,交、直流系统的扰动、故障等将给系统的稳定运行带来极大的风险。例如,切机、发电机减负荷、交流系统故障、大负载投入等工况使系统发出的功率小于直流系统传输的功率时,如果直流系统采用常规的定功率或定电流控制,则发电机组的调频特性会减小系统频率,增大发电机组的电磁功率以实现发出和输送电磁功率间的动态平衡。如果发电机组的调速系统具有足够的响应速度,且发电机组具有新增功率的能力,则经过一段时间的调整,整个系统可达到一个新的稳态工作点。反之,如果发电机组的调速系统响应速度较慢或整个发电机组的功率输出已达上限,则系统将会出现持续性的功率不平衡,最终导致整个系统的崩溃。

与交流输电方式相比,直流输电系统具有高度可控的优点,因此可利用该特点找到有针对性的解决办法。

## 2 附加控制

HVDC 具有高度可控的特性,对于我国已建和在建的直流工程,要求其 0.1pu 电流指令阶跃的响应时间在 70 ms 以内<sup>[16]</sup>。直流工程可快速实现功率的快速提升、下降或按预定变化趋势调节等各种直流调制功能。例如,三常工程的直流调制功能多达 11 种类型<sup>[17]</sup>。

整流侧在扰动情况下的系统功率不平衡是导致系统稳定运行破坏的根本原因。因此,消除或减小发电机组输出功率与直流系统传输功率间的不平衡将是一种行之有效的解决办法。交流系统的频率变化可反映系统功率平衡的状况,例如系统功率过剩会导致频率上升,功率不足时会引起频率下降。

为减小发电机组出力与 HVDC 输送功率不匹配带来的不利影响,采用了附加控制器,该控制器引入频率反馈量,并根据频率的变化调节 HVDC 的功率指令。附加控制器的基本工作原理是根据系统频率的减小来降低 HVDC 的输送功率从而使发电机输出功率和直流系统输送的功率相平衡,以达到系统稳定运行的目的,如图 2 所示。

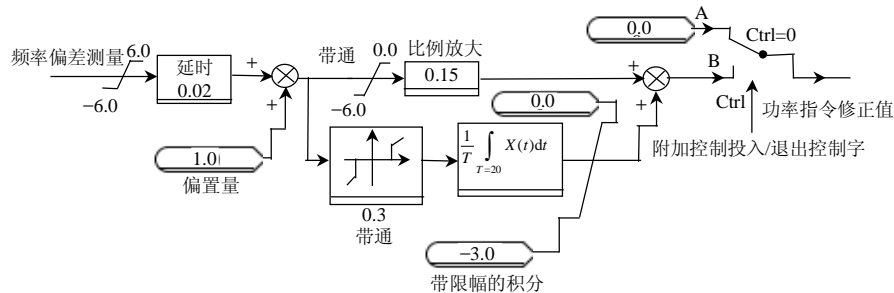


图 2 附加控制器工作原理

Fig. 2 Block diagram of the additional control scheme

## 3 RTDS 建模

针对送端孤岛运行方式,在 RTDS 上建立了详细的模型,包括送端 6 台发电机及其输电线路和 HVDC 两侧换流器。在送端孤岛运行方式下,整流侧及交流系统发电机的状态对整个系统的稳定运行起决定性作用,因此 HVDC 逆变侧交流系统以等值电源代替。送端发电机组模型包括发电机、调速器、励磁系统和电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS),其参数基本与系统分析用的 BPA 数据一致。送端发电机组的每台发电机额定功率为 600 MW,同一电厂的

2 台发电机通过输电线连接至换流母线或其它节点,线路参数与实际工程一致。直流输电系统仿照三常直流工程建模,额定直流电压为 $\pm 500$  kV,额定直流功率为 3000 MW,整流站和逆变站均配置有交、直流滤波器,整流侧交流母线另加装有 2 组各 300 MW 的负荷。

基本控制策略是整流侧选为定电流控制,逆变侧选为定熄弧角控制。附加控制的输出用于修正基本电流指令,修正后的电流指令将用于产生触发换流器的点火脉冲。

### 4 扰动试验

为验证附加控制的效果,选取典型功率变化进行了仿真实验,实验内容及简明结果见表 1。限于篇幅,只给出第 5、6 项实验的结果对比,如图 3 所示,图中  $P_{GEN1} \sim P_{GEN6}$  为送端 6 台发电机的功率输出。由表 1 可见:

(1) 在发电机组具有充裕备用容量或系统扰动较小时,无论有、无附加控制,交、直流系统均

能稳定运行,如第 1、2、7、8、11、12 项实验。

(2) 当发电机组出力已达其最大值或系统负荷增加较多时,无附加控制时仅依靠原有系统的调节无法保持系统功率的平衡,直流电流、电压和发电机功率将大幅振荡,最终导致交、直流系统稳定运行的破坏。附加控制暂时减小输送的功率以平衡系统的功率缺额,使系统稳定运行,如第 3、4、5、6、13、14 项实验。

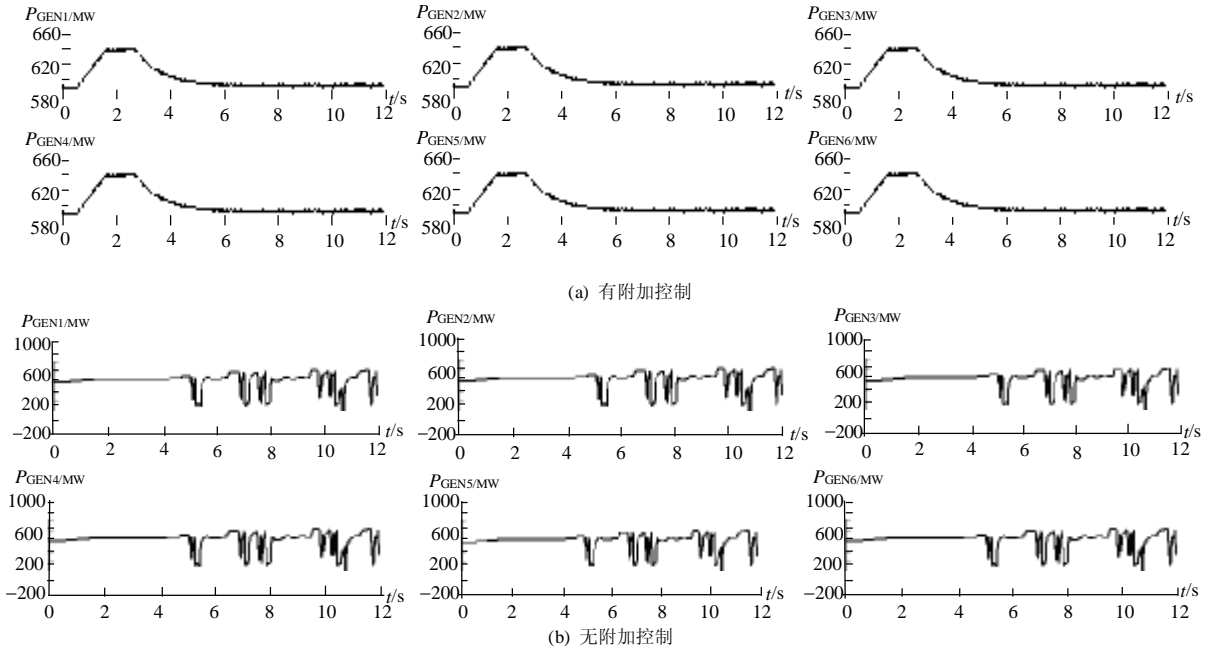


图 3 HVDC 输送功率 3000 MW、HVDC 电流指令阶跃 300 A 时的发电机功率输出

Fig. 3 Output of the generators when 300 A current order step occurs with 3000 MW power transmission by HVDC

表 1 扰动实验内容及结果

Tab.1 Disturbances test and test results

序号	实验条件	实验内容	实验结果
1	直流输送功率 3000 MW, 无附加控制	电流指令阶跃 300 A	有无附加控制系统均保持稳定
2	直流输送功率 3000 MW, 有附加控制	电流指令阶跃 300 A	
3	直流输送功率 3000 MW, 无附加控制	切 1 台发电机	无附加控制时不能稳定运行, 有附加控制时能稳定运行
4	直流输送功率 3000 MW, 有附加控制	切 1 台发电机	
5	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 无附加控制	电流指令阶跃 300 A	无附加控制时不能稳定运行, 有附加控制时能稳定运行
6	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 有附加控制	电流指令阶跃 300 A	
7	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 无附加控制	电流指令阶跃 300 A, 2 s 后恢复原值	有无附加控制系统均保持稳定
8	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 有附加控制	电流指令阶跃 300 A, 2 s 后恢复原值	
9	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 无附加控制	切 1 台发电机	有无附加控制系统均不能保持稳定
10	直流输送功率 3000 MW, 送端电网负荷 600 MW, 有附加控制	切 1 台发电机	
11	直流输送功率 3000 MW, 无附加控制	投 300 MW 负荷	有无附加控制系统均能保持稳定
12	直流输送功率 3000 MW, 有附加控制	投 300 MW 负荷	
13	直流输送功率 3000 MW, 无附加控制	投 600 MW 负荷	无附加控制时不能稳定运行, 有附加控制时能稳定运行
14	直流输送功率 3000 MW, 有附加控制	投 600 MW 负荷	

(3) 在发电机组出力已达其最大值时,对于切机这类导致系统发出功率急剧减小的严重故障,附加控制也不能维持系统的稳定运行,如第9、10项实验。

## 5 结论

在 HVDC 送端孤岛运行方式下, HVDC 与发电机组间的耦合比较紧密,相互作用明显。在不采取任何附加控制时,当发电机组出力较大时, HVDC 的功率指令增加、切机、投负荷等会导致发电机发出功率与 HVDC 输送功率(包括交流系统负荷)间的不平衡,最终导致系统的不稳定运行。附加控制主要反映系统功率不平衡而导致的系统频率下降,通过减小 HVDC 的功率指令而达到系统功率平衡,能明显提高系统运行的稳定性。

## 参考文献

- [1] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.  
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21(in Chinese).
- [4] 李峰, 管霖, 钟杰峰, 等. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 1-4.  
Li Feng, Guan Lin, Zhong Jiefeng, et al. Study on stability of Guangdong AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 1-4(in Chinese).
- [5] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.  
Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang. Special issues and suggestions on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17(in Chinese).
- [6] 任震, 何畅炜, 高明振. HVDC 系统电容换相换流器特性分析(I): 机理与特性[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 55-58.  
Ren Zhen, He Changwei, Gao Mingzhen. Characteristic analysis of capacitor commutated converter in HVDC system(I): mechanism and characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 55-58(in Chinese).
- [7] 任震, 高明振, 何畅炜. HVDC 系统电容换相换流器特性分析(II): 无功功率特性[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 4-8.  
Ren Zhen, Gao Mingzhen, He Changwei. Characteristic analysis of capacitor commutated converter in HVDC system(II): reactive power characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 4-8(in Chinese).
- [8] 李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. AC/DC 混合输电系统分散协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 37-42.  
Li Guodong, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Decentralized coordinated control of the AC/DC hybrid transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 37-42(in Chinese).
- [9] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.  
Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).
- [10] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24.  
Zhang Jianshe, Zhang Yao, Zhang Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24(in Chinese).
- [11] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.  
Chen Shuyong, Li Xinnian, Yu Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6(in Chinese).
- [12] 李战鹰, 任震, 曾坚勇. 多馈入直流输电系统交流侧滤波方案的计[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 27-30.  
Li Zhanying, Ren Zhen, Zeng Jianyong. Design of filtering scheme at AC side of multi-infeed DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 27-30(in Chinese).
- [13] 东北电力设计院. 呼伦贝尔至辽宁直流输电工程接入系统边界条件[R]. 长春: 东北电力设计院, 2006.
- [14] Krishnaya P C S. A review of unit generator-converter connections for HVDC transmission[C]. IEEE/CSEE Joint Conference on High Voltage Transmission Systems, Beijing, 1987: 355-362.
- [15] RTDS Technology Corporation. RTDS controls library manual [Z]. Canada: RTDS Technology Corporation, 2004.
- [16] 北京网联直流工程技术有限公司. 呼伦贝尔—辽宁±500kV 直流输电工程功能规范书[Z]. 北京: 北京网联直流工程技术有限公司, 2006.
- [17] ABB. The three Gorges-Changzhou ±500 kV DC transmission project: DC power and current control modes and features [Z]. Ludvika: ABB, 1999.

收稿日期: 2006-10-16.

作者简介:

马玉龙(1975—), 男, 博士, 从事高压直流输电的仿真、设计工作;  
石岩(1963—), 男, 高级工程师, 从事高压直流输电工程咨询、成套设计和电力系统实时仿真研究工作, E-mail: yanshi@sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)