

云广特高压直流输电系统孤岛运行的稳定控制措施

胡铭¹, 金小明², 高鹏¹, 田杰¹, 吴小辰²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100;
2. 中国南方电网公司技术研究中心, 广东省广州市 510623)

Stability Control Strategies for ± 800 kV DC Transmission System From Yunnan to Guangdong Under Islanded Operation

HU Ming¹, JIN Xiao-ming², GAO Peng¹, TIAN Jie¹, WU Xiao-chen²

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu Province, China; 2. Technology Research Center, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Using real-time digital simulator (RTDS) and the prototype of control-protection equipment for UHVDC power transmission, a real-time closed-loop simulation system for ± 800 kV DC power transmission is built and by which the simulation of fault happened in AC system at sending end under the islanded operation of ± 800 kV DC transmission system from Yunnan to Guangdong is carried out, the reasons causing system instability are analyzed and the control measures to improve system stability are proposed and validated by simulative tests.

KEY WORDS: UHVDC power transmission; stability; real time digital simulator (RTDS); islanded operation

摘要: 基于实时数字仿真器和特高压直流控制保护样机搭建了云南—广东 ± 800 kV 特高压直流输电实时闭环仿真系统。在该仿真环境中对云南—广东 ± 800 kV 特高压直流输电系统“孤岛”运行方式下的送端交流系统故障进行了仿真研究, 分析了系统失稳的原因, 提出了提高系统稳定的控制措施, 并通过仿真试验验证了控制措施的有效性。研究结果可为今后 ± 800 kV 云南—广东特高压直流输电系统“孤岛”运行方式下系统运行提供参考。

关键词: 特高压直流输电; 稳定; 实时数字仿真器; 孤岛运行

0 引言

为了节约输电走廊资源、提高输电资源的利用率, 我国开始建设 ± 800 kV 特高压直流输电工

程^[1-4]。“十一五”期间云南新增外送广东的电力将通过新建的 1 回云南—广东 ± 800 kV 特高压直流输电线路送到负荷中心^[5]。云广特高压直流工程在 2010 年实现双极投运后, 可能采用孤岛运行方式, 即小湾电厂和金安桥电厂全部或部分机组通过 500 kV 交流线路接入楚雄换流站, 与云南主网架不进行交流连接^[6]。

孤岛运行方式下, 系统运行条件与联网方式会有很大变化。目前世界上采用孤岛运行方式的直流工程都靠近发电站, 而楚雄换流站与主要电源的距离在 250 km 以上, 因此, 研究送端孤岛运行方式下系统的稳定水平、交直流系统的相互影响、对直流控制保护的要求等问题, 具有重要意义, 可为今后类似的特高压直流系统建设和运行提供技术支持^[7-9]。

本文利用实时数字仿真器 (real-time digital simulator, RTDS) 和特高压直流控制保护系统, 建立了云南—广东 ± 800 kV 特高压直流输电闭环实时数字仿真模型, 在此基础上对孤岛运行方式下系统稳定问题进行研究, 分析系统失稳的原因, 提出相应的解决措施。

1 仿真环境

RTDS 是当今优秀的实时数字仿真系统之一, 可用于控制保护设备的闭环测试、系统分析研究及仿真培训^[10-14]。基于电磁暂态数字仿真原理的 RTDS 能够实时详细地模拟直流输电系统, 具备全面分析直流输电系统特性的能力^[15]。采用实际特高

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2006BAA02A17, 2006BAA02A30)。

National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China (2006BAA02A17, 2006BAA02A30)。

压直流控制保护系统参与的闭环控制仿真更贴近实际，仿真结果对实际工程更具参考价值^[16]。

RTDS 的基本组成部分称为组(Rack)，Rack 的数量决定了可仿真系统的规模。基于 RTDS 的云广 ± 800 kV 直流系统孤岛运行仿真模型如图 1 所示，在本次建模中，共采用 4 个 Rack：分别利用 1 个 Rack 模拟特高压直流输电系统整流侧和逆变侧一次电气系统，2 个 Rack 之间通过直流输电线路连接；利用 2 个 Rack 分别搭建云广特高压直流送端系统小湾和金安桥电厂的机组及其出线，形成“八机四线”孤岛运行方式，受端广东交流系统采用内阻抗表示系统强度的等值电压源模拟。RTDS 通过接口板卡与实际控制保护系统直接相连，形成闭环控制，具体连接方式如图 2 所示。

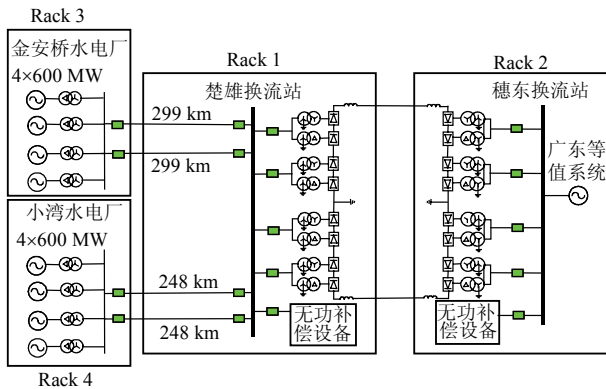


图 1 基于 RTDS 的云广 ± 800 kV 直流系统孤岛运行仿真模型
Fig. 1 RTDS simulation model of ± 800 kV Yun-Guang UHVDC transmission system in island operation

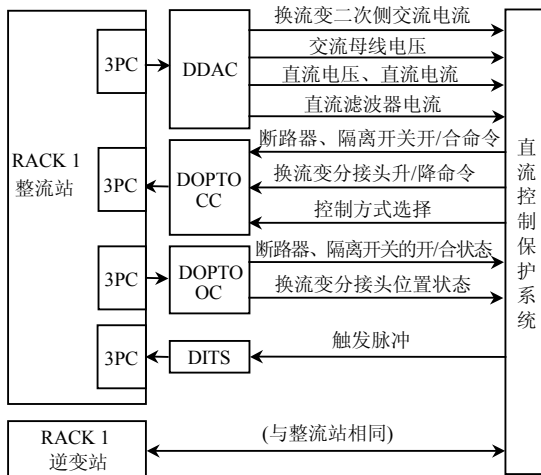


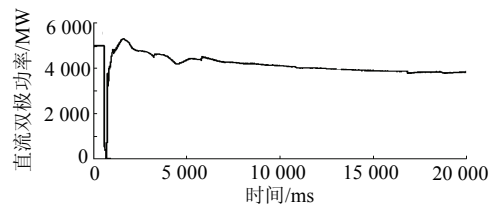
图 2 特高压直流控制保护设备与 RTDS 的连接示意图
Fig. 2 Sketch diagram of the link of UHVDC control and protection system with the RTDS

2 系统稳定分析

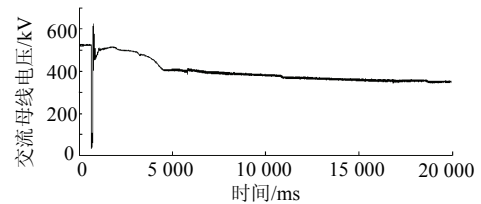
在我国 ± 500 kV 直流输电工程中，通常采用定功率控制方式运行。对于云广特高压直流工程，在孤

岛运行方式下，由于送端系统较弱，采用定功率控制方式运行时，送端交流系统发生接地故障，可能会导致系统失稳。现以最严重的三相永久性短路故障为例进行说明，并据此提出相应的稳定控制策略。

小湾至楚雄换流站 500 kV 双回交流线路中的 1 回线在楚雄侧发生三相永久性短路故障，故障后 0.1 s 两侧的主保护正确动作，切除故障相，仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知，断开故障线路后，送端交流系统电压失稳。



(a) 直流双极功率



(b) 楚雄换流站交流母线电压

图 3 直流定功率控制方式下的系统失稳仿真结果
Fig. 3 Simulation result of system losing stability when UHVDC in bip-power control mode

具体分析如下：在交流系统发生故障后，换流站交流母线电压降低，导致直流电压下降，由于直流采用定功率控制，因此直流电流在直流控制系统的作用下迅速增加以维持直流功率的恒定，导致直流消耗的无功依然较大，而此时交流系统提供的无功严重不足，最终导致了交流系统电压不断降低，无功不平衡进入恶性循环，系统交流电压低于 400 kV 不能恢复，系统电压最终失稳。

由于楚雄换流站计划安装的静止无功补偿器 (static var compenstator, SVC) 容量只有 240 Mvar，对系统内发生故障后的稳定性影响较小，仅仅由于提供了一定的无功，使换流母线电压略有提高。在直流定功率控制方式下，安装 SVC 后，小湾出线楚雄站侧三永故障后楚雄换流站母线电压幅值较没有安装 SVC 时提高了 10 kV 左右。

3 提高系统稳定性的控制措施

3.1 故障后延时 1 s 降低直流功率

故障后直流延时 1 s 降低直流功率可大大提高系统的稳定性。在云广直流孤岛额定满载运行，直

流定功率控制方式下,小湾电厂出线换流站侧发生三相永久性故障,故障发生后延时 1 s 降低直流功率 100 MW,系统维持稳定,云广直流输电系统的主要电气量变化轨迹如图 4 所示。

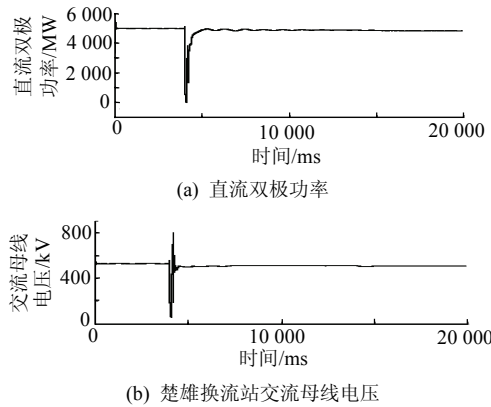


图 4 采用快降直流功率策略后系统恢复稳定仿真结果
Fig. 4 Simulation result of system restoring stability using quick ramp down DC power strategy

3.2 滤波器/补偿电容器组的快投策略

在云广直流孤岛双极额定功率运行、直流定功率控制方式下,采用直流控制系统的交流滤波器/补偿电容器组的快投策略,可实现在故障后 2 s 内快速投入剩余的 3 组交流滤波器。仿真表明,该策略可有效提高系统故障后的稳定性,防止系统电压失稳。在云广直流孤岛运行、定功率控制方式下,采用交流滤波器/补偿电容器组的快投策略,小湾电厂出线换流站侧发生三相永久性故障,系统维持稳定,云广直流输电系统的主要电气量变化轨迹如图 5 所示。

3.3 快速投入 SVC 固定补偿电容器

为了研究 SVC 容性容量对系统稳定性的影响,恒定投入 SVC 的高通三次谐波滤波器组(容量为 120 Mvar),并使 SVC 的晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)稳态触发角为 110° 左右,故障后可以尽可能发挥 SVC-TCR 储存的无功,通过改变 SVC 无功补偿电容器的容量来研究 SVC 容性无功容量对系统稳定性的影响。图 6 是送端“八机四线”孤岛运行方式下,直流采用定功率控制、输送功率为 5000 MW、小湾电厂单回出线换流站侧发生三相永久性故障、设置 SVC 补偿电容器组容量分别为 120、240 和 360 Mvar,并在故障 500 ms 后迅速投入 SVC 补偿电容器组时,系统换流母线电压和直流输送功率的轨迹图。由图 6 可见,故障后快速投入 SVC 固定补偿电容器组可提高系统的稳定性,且 SVC 的容性容量越大,越利于系统电压的恢复。

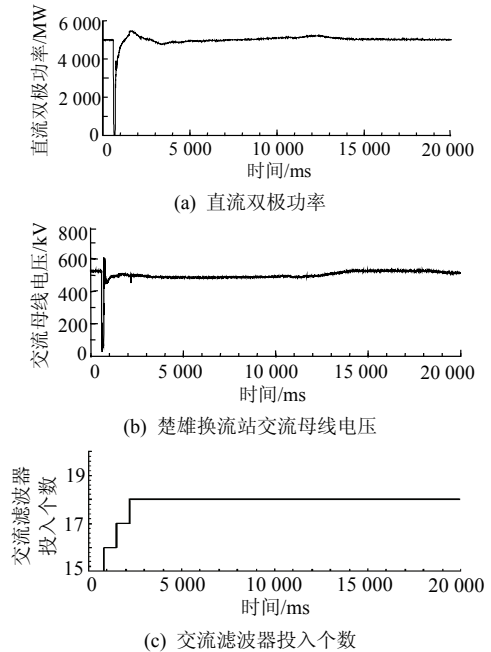


图 5 采用快投交流滤波器策略后系统恢复稳定仿真结果
Fig. 5 Simulation result of system restoring stability using quick switching in AC filters strategy

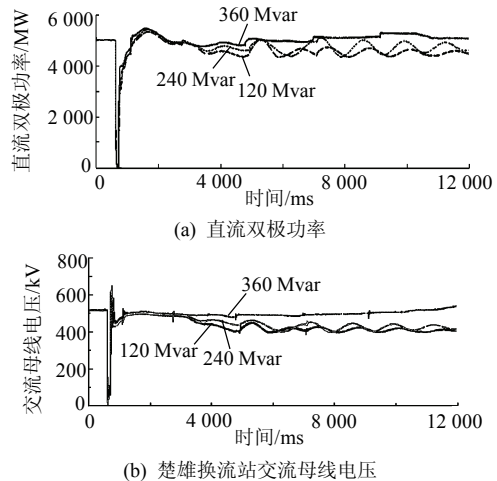


图 6 SVC 容性容量对系统稳定性的影响
Fig. 6 Influence of SVC capacitive capacity on the system stability

4 结论

1) 云广特高压直流送端“八机四线”孤岛运行方式下,当直流运行采用定功率控制方式,送端一回交流线三永故障时,由于故障导致电压降低,直流控制系统试图通过增大直流电流去维持功率恒定,导致无功严重不平衡,系统有可能失去电压稳定性。

2) 系统故障失稳后,采用延时 1 s 快速降低 100 MW 直流功率的策略或快投交流滤波器/补偿电容器组策略都可提高系统的稳定性。

3) 系统故障失稳后, 楚雄换流站 SVC 安装容量(240 Mvar)相对较小, 对系统内发生故障后的稳定性影响较小。如果增大 SVC 的容性容量, 并在故障后快速投入, 则可提高系统的稳定性。SVC 的容性容量越大, 越有利于系统电压的恢复。

参考文献

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of Ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [2] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 6-12.
Huang Daochun, Wei Yuanhang, Zhong Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-12(in Chinese).
- [3] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18.
Zhang Wenliang, Wu Weining, Hu Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 16-18(in Chinese).
- [4] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 1-4.
Li Licheng. Technical characteristics and engineering applications of UHVDC transmission system[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 1-4(in Chinese).
- [5] 中国南方电网公司. 云南—广东±800 kV 特高压直流输电工程技术规范书[Z]. 广州: 中国南方电网公司, 2006.
- [6] 中国南方电网公司. ±800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 23-24.
- [7] 中国南方电网技术研究中心. ±800 kV 云广特高压直流工程对南方电网安全稳定影响研究报告[R]. 广州: 中国南方电网公司, 2005.
- [8] 吴宝英, 陈允鹏, 陈旭, 等. ±800 kV 云广直流输电工程对南方电网安全稳定的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 5-12.
Wu Baoying, Chen Yunpeng, Chen Xu, et al. Study on impacts of ±800 kV Yunnan-Guangdong HVDC transmission project on security and stability of China southern power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 5-12(in Chinese).
- [9] 南方电网技术研究中心, 南京南瑞继保电气有限公司, 西南电力设计院, 等. ±800 kV 云广特高压直流送端孤岛运行方式研究报告[R]. 广州: 中国南方电网公司, 2007.
- [10] 温荣, 谭建成. 串联电容补偿线路的相差保护特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 86-90.
Wen Rong, Tan Jiancheng. Study on phase comparison protection for series compensated line[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 86-90(in Chinese).
- [11] 许汉平, 魏威, 黄涌, 等. RTDS 行波线路模型用于输电线路故障测距的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 47-49, 62.
Xu Hanping, Wei Wei, Huang Yong, et al. Application of traveling wave model of RTDS to fault location on power transmission lines [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 47-49, 62(in Chinese).
- [12] 王栋, 童陆园, 洪潮. 数字计算机机电暂态与 RTDS 电磁暂态混合实时仿真系统[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 42-46.
Wang Dong, Tong Luyuan, Hong Chao. Digital computer electro mechanical transient and RTDS electro magnetic transient hybrid real-time simulation System[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 42-46(in Chinese).
- [13] 常浩, 张民, 马为民. 实时数字仿真器的应用[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 56-60.
Chang Hao, Zhang Min, Ma Weimin. Real time digital simulator (RTDS) and its applications[J]. Electric Power, 2006, 39(7): 56-60(in Chinese).
- [14] 马玉龙, 陶瑜, 周静, 等. 基于实时数字仿真器的特高压直流换流单元投退特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 5-10.
Ma Yulong, Tao Yu, Zhou Jing, et al. Analysis on deblocking and blocking characteristics of UHVDC commutation units based on real-time digital simulator[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 5-10(in Chinese).
- [15] Vijay K S. HVDC and FACTS controllers-applications of static converters in power systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004: 265-272.
- [16] Forsyth P, Kuffel R, Wierchx R, et al. Comparison of transient stability analysis and large-scale real time digital simulation [C]. Proceeding of IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, 2001.



胡铭

高鹏(1980—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统仿真。

收稿日期: 2009-01-05。

作者简介:

胡铭(1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统仿真, E-mail: hum@nari-relays.com;

金小明(1964—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计及交直流电力系统分析;

(编辑 褚晓杰)