

# 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析

廖民传<sup>1</sup>, 蔡广林<sup>2</sup>, 张勇军<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510600)

**摘要:** 随着南方电网西电东送规模的日益扩大, 受端电网的暂态电压稳定问题日益凸显。深入探讨了南方电网的受端系统的暂态电压稳定问题出现的机理和影响因素, 通过对失稳故障的分析表明交流线路、直流换流站的无功需求会逐步恶化受端系统的稳定性, 最终由局部地区的负荷失稳导致整个区域发生电压崩溃。针对失稳故障分析比较了相应的稳定措施, 其中动态无功补偿措施能够有效地抑制异步电动机诱发的电压崩溃。

**关键词:** 交直流混合系统; 暂态电压稳定; 受端电网; 电压崩溃

## Transient voltage stability of received power grid in AC/DC hybrid power systems

LIAO Min-chuan<sup>1</sup>, CAI Guang-lin<sup>2</sup>, ZHANG Yong-jun<sup>1</sup>

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** With the development of transmission of electricity from the west to the east in south China power grid, the transient voltage stability problem emerges in received power grid gradually. This paper discusses the transient voltage stability mechanism and influence factor. The result shows that reactive power requirements of AC lines and DC inverter will deteriorate voltage stability in the dynamic process, and the local areas load unstable will cause voltage collapse in the whole system finally. The corresponding control measures are also analyzed, and dynamic reactive compensation can restrain voltage collapse caused by induction motor load.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50337010) and National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.06025630).

**Key words:** AC/DC hybrid power systems; transient voltage stability; received power grid; voltage collapse

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0001-04

## 0 引言

直流输电具有远距离、大容量传输的优势, 且控制调节灵活, 因而被用于大规模电网的互联, 成为“西电东送”的主要传输通道之一。在交直流混合输电系统中, 直流线路的闭锁故障及交流输电通道故障切除会对受端系统产生较大的冲击, 导致受端系统发生暂态电压失稳<sup>[1-5]</sup>。南方电网至2010年将形成“八交五直”的交直流混合输电网络。随着电网规模的不断增大和负荷中心特征日趋显著, 广东受端电网的暂态电压稳定问题日益突出。

针对交直流混合系统的受端电网而言, 受端电网的网架结构、负荷水平、电源分布、直流落点、直流控制方式等因素都会对系统的电压稳定性产生

影响。广东电网的直流落点之间、直流落点与交流联络线之间的电气距离接近。因此交直流联络线的严重故障、以及直流落点附近的交流系统故障都会对受端电网产生较大的影响<sup>[6-10]</sup>。

复杂电网发生暂态电压不稳问题甚至是电压崩溃事件是多种因素共同影响的结果, 而对于失稳动态过程的分析还不够充分。本文通过对南方电网2010年夏大方式的电压稳定分析, 详细描述了发生暂态电压失稳的原因和影响因素, 并分析相应的稳定措施。

## 1 模型与研究工具

负荷模型是影响电压稳定的关键因素。在暂态过程中, 异步电动机模型参数及比例会对系统的暂态电压稳定性产生影响, 因此在动态仿真计算中必须考虑异步电动机的模型。由于广东电网的实际动态负荷参数并未提供, 因此在本文的仿真分析中采

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (50337010); 广东省自然科学基金项目 (06025630)

用 IEEE 建议的等效异步电动机参数<sup>[1,2]</sup>。负荷类型选择两种比例的负荷：I 类采用 40% 的异步电动机负荷+60% 的静态负荷；II 类采用 60% 的异步电动机负荷+40% 的静态负荷。其中静态负荷模型按照 30% 恒阻抗+40% 恒电流+30% 恒功率分配。

本文采用中国电力科学研究院开发的 BPA 作为时域仿真软件。电压稳定分析中采用的电压失稳指标为：扰动切除后，电压低于 0.75（标么值）不超过 1 s。电压崩溃为：扰动切除后电压持续地、不可逆转地下降至 0.5（标么值）以下。

## 2 电压稳定分析及机理研究

### 2.1 电压稳定分析

在对南方电网 2010 年夏大方式的电压稳定分析中，单一故障下不会引发电网电压稳定问题，系统承受故障的能力较强。在大扰动故障分析中，南方电网主要的严重故障包括直流的双极闭锁故障和西电的交流送电通道发生切除双回线路故障。表 1 中给出了直流双极闭锁故障的分析结果。

表 1 直流双极闭锁故障系统稳定性

Fig.1 Stability of systems after DC double pole block

| 故障    | 纯静态负荷 | 负荷 I 型 | 负荷 II 型 |
|-------|-------|--------|---------|
| 天广    | 稳定    | 稳定     | 稳定      |
| 贵广 I  | 稳定    | 稳定     | 稳定      |
| 贵广 II | 稳定    | 稳定     | 崩溃      |
| 三广    | 稳定    | 稳定     | 稳定      |
| 云广    | 崩溃    | 崩溃     | 崩溃      |

分析表明，随着异步电动机负荷比例的增大，南方电网的动态电压稳定性逐步恶化。云广特高压发生双极闭锁故障后，除了受端电网机组和负荷自调节外，其输送的功率由交流输电通道承担。由于转移功率超过了交流线路的传输极限，所以导致系统快速失稳。为了维持系统稳定，需在云南送端切除部分机组。

贵广 II 直流故障在纯静态负荷和 I 型负荷条件下能够保持稳定，而在 II 型负荷时电网发生崩溃，其转移功率并未超过交流输电通道的传输极限。其失稳过程和主导因素与云广特高压失稳故障不同。为了能够深入分析广东电网发生暂态电压失稳的原因，需要分析系统刚好发生崩溃时的情况。本文针对贵广 II 直流发生双极闭锁故障进行仿真，逐步改变动态负荷的比例直到系统刚好发生电压崩溃，此时异步电动机比例为 58%。

故障后电压跌落最快的区域为北郊、罗洞地区。图 1 给出了 2010 年北郊、罗洞站附近 500 kV 网架结构。在南方电网夏大方式下，广东电网采用分区供电方式，北郊地区负荷由北郊 500 kV 站供电；由

该母线供电的广州地区属于负荷中心，负荷水平较高；该地区 220 kV 网架上无统调电厂，缺乏动态无功电源的支撑，仅在 500 kV 网架上有广州蓄能电厂可提供部分动态无功支撑能力，但蓄能电厂参与系统调峰，其开停机不确定；天广直流落点接于北郊 220 kV 母线。因此在故障条件下该地区易于发生暂态电压稳定问题。

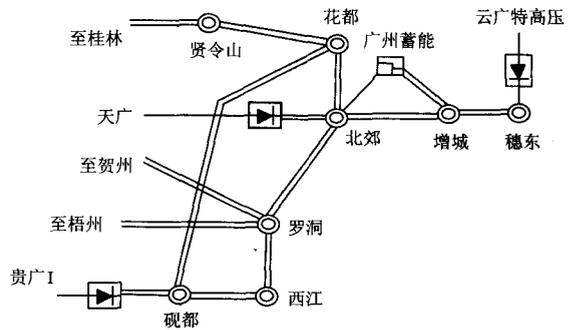


图 1 2010 年 500 kV 网架结构示意图 (局部)

Fig.1 Sketch of 500kV networks in 2010

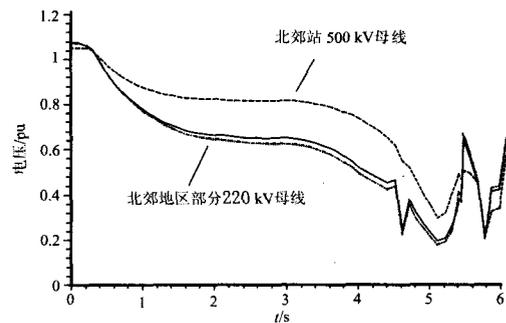


图 2 北郊地区母线电压

Fig.2 Bus voltage at Beijiao area

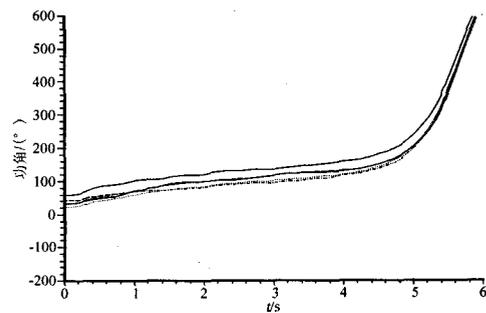


图 3 送端发电机组功角曲线

Fig.3 Generator power angle curves at sending terminal

图 2 和图 3 分别为故障后北郊地区的母线电压和送端贵州机组的相对功角曲线，参考机组为沙角 B 厂 #1 机组。由图可以看出，故障后北郊地区的电压水平快速跌落，维持在低压运行 2 s 后，在 3.4 s

时系统发生快速失稳。由功角曲线可以看出, 送端发电机组的功角在 5 s 后才发生单调爬升失稳。这说明该系统失稳是由于电压失稳引起的, 然后导致功角相继失稳。

## 2.2 电压失稳机理分析

通过对贵广 II 故障后的系统响应分析, 可以发现导致系统发生暂态电压稳定问题的主导因素主要有: 功率转移导致交流通道无功损耗增大; 直流换流站的无功需求; 异步电动机的动态无功需求; 缺乏足够的动态无功支撑等。

贵广 II 直流故障后, 直流线路功率转移到交流输电通道承担, 线路的传输功率增大导致线路电流增大, 无功损耗显著增多。以玉茂线为例, 故障前单回线路传输功率为 858 MW, 电流为 935 A, 无功损耗为 34.45 Mvar。故障后 4 s 时刻的传输功率增大了 969 MW, 电流增大了 1.84 kA, 无功损耗增多了 269.1 Mvar。由于送电通道中点的广西电网本身缺乏足够的无功支撑, 因此大量的无功需求由广东电网提供, 导致罗洞、北郊地区的电压普遍偏低。故障后的系统电压偏低导致电容器的无功输出降低, 加剧了系统的无功短缺。

故障期间, 为了抑制功率振荡, 提高系统的暂态稳定性, 直流功率调制是有效的控制手段。直流功率调制能够快速补偿广东电网的功率缺额, 但也增大了换流站的无功需求, 恶化了受端的电压稳定性。图 4 给出了故障后天广直流、贵广 I 直流单极输送的功率曲线。在初始阶段, 调制信号导致直流的输送功率增大。随着受端系统的电压恶化, 换流站的交流母线电压偏低, 换流站的无功需求进一步增大, 反过来进一步恶化了受端电网的电压稳定性。在此过程中, 直流的低压限流控制动作, 有效地减缓了该恶化的过程。但由于受端系统的异步电动机的影响, 最终导致系统发生电压失稳。

异步电动机负荷是导致系统发生电压失稳的主要原因之一, 其无功电压特性会导致端电压不断下降, 同时随着北郊站 500 kV 电压的下降, 转子转差增大直到发生堵转失稳。图 5 给出了北郊-麒麟 220 kV 的传输有功和无功功率, 该线路主要向广州地区的负荷供电。图中, 随着负荷端电压的逐步下降, 负荷消耗的有功下降, 无功增多, 部分异步电动机率先发生失稳, 恶化了其它异步电动机的运行状况, 最终导致了整个地区发生电压失稳。

综上所述, 贵广 II 直流故障后受端系统发生电压失稳是由于多种因素不断恶化受端电网的运行状况, 由局部异步电动机失稳诱发导致系统失稳。受端系统稳定性受负荷模型的影响较大, 在稳定分析

中必须考虑异步电动机负荷的影响。

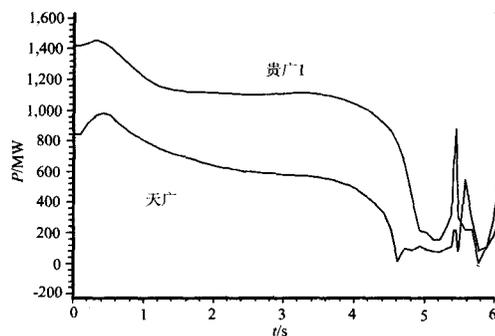


图 4 故障期间直流单极输送功率

Fig.4 Post-fault power transmission of single-pole

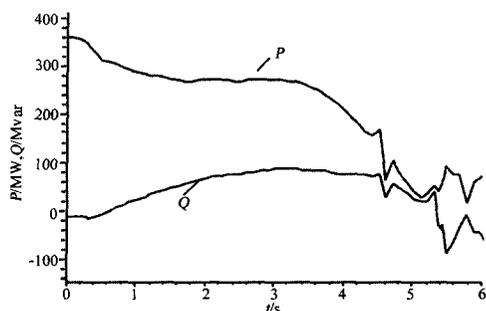


图 5 北郊-麒麟线路输送有功功率和无功功率

Fig.5 Active/reactive power transmission of the line Bei-Qi

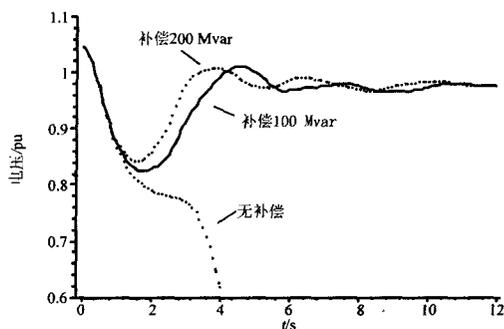


图 6 北郊站电压与动态无功补偿的关系

Fig.6 Relationship of voltage and var in Beijiao station

## 3 暂态电压失稳对策研究

为了提高交直流混合输电系统的暂态稳定性, 需要在严重的直流闭锁故障后采用相应的稳定措施。主要的方法有送端切机, 直流调制, 无功补偿, 保留换流站补偿电容<sup>[6]</sup>等。

异步电动机的失压保护能够在机端电压偏低时及时切除, 从而避免由于电动机吸收过多的无功, 甚至是堵转而造成电压失稳。在贵广 II 故障分析中, 北郊地区的鹿鸣站是率先发生电动机堵转负荷节

点。若设定异步电动机的失压保护为电压低于 0.7 s 达到 0.5 s 则切除电动机, 则故障后广东电网能够保持稳定。如果遇到更大的故障扰动, 则需要切除更多的异步电动机负荷才能维持系统的稳定。但负荷的不确定因素较多, 依靠负荷侧的控制难以确保系统在大扰动后的稳定性。

动态无功补偿能够为系统故障期间提供动态无功支撑, 从而提高线路的传输极限和满足负荷侧的无功需求, 更好地稳定了系统的电压。

在云广特高压直流发生双极闭锁后, 由于不平衡功率导致机组快速失稳, 所以需要在送端快速切除发电机组才能维持系统稳定。当负荷采用 I 类时, 需要切除云南 1 900 MW 机组, 系统能够维持暂态稳定; 负荷采用 II 类负荷时, 需切除云南 2 700 MW 机组。在西电的交流通道上安装 STATCOM, 贺州站、梧州站的安装效果要优于受端侧的罗洞、北郊站。在贺州安装 300 Mvar 的 STATCOM, 在 II 类负荷条件下, 云南侧可以少切一台机组。

贵广 II 故障中北郊地区的异步电动机负荷是系统发生崩溃的诱因。因此在北郊站安装 STATCOM 设备作为动态无功支撑是抑制负荷侧失稳的有效手段。图 6 给出了补偿后的罗洞站 500 kV 母线电压, 随着动态补偿设备容量增大, 能有效地提高系统的暂态电压性能。动态无功补偿对于受端系统负荷稳定性的提高效果明显, 可抑制负荷区域失稳。

#### 4 结论

通过对南方电网 2010 年运行方式的电压稳定分析, 以及对贵广 II 直流双极闭锁故障临界失稳状态的动态仿真, 结果表明:

1) 动态负荷对电压稳定分析的结果会产生较大的影响, 随着动态负荷比例的增加, 受端系统的暂态电压稳定性逐步恶化。

2) 直流的双极闭锁故障会引起系统发生电压稳定问题。在 2010 年方式下, 云广特高压直流发生双极闭锁会导致系统失稳。

3) 受端电网发生电压失稳是故障后多种因素共同恶化的结果, 换流站附近地区的异步电动机失稳会逐步诱使电网发生电压崩溃, 动态无功支撑是有效的抑制措施。

#### 参考文献

[1] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.  
[2] Cutsem T V, Vournas C. Voltage Stability of Electric Power System[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.

- [3] 马世英, 印永华, 李柏青, 等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 7-13.  
MA Shi-ying, YIN Yong-hua, LI Bai-qing, et al. A Research on Voltage Stability Evaluation Criteria for Interconnected Power Grid in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 7-13.
- [4] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 33-36.  
ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Simulation Validity Test of the HVDC QSS Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 33-36.
- [5] 杨卫东, 薛禹胜, 荆勇, 等. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化, 2003, 23(17): 68-72.  
YANG Wei-dong, XUE Yu-sheng, JING Yong, et al. Emergency DC Power Support to AC Power System in the South China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 23(17): 68-72.
- [6] 白岩, 陈辉祥, 王仲鸿. 直流双极闭锁故障下提高暂态电压稳定性策略探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 93-96.  
BAI Yan, CHEN Hui-xiang, WANG Zhong-hong. Discussion on Strategies to Enhance the System Transient Voltage Stability Under the DC Bi-polar Block Fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 93-96.
- [7] 陈辉祥, 王仲鸿, 崔文进, 等. 广东电网电压稳定研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 86-89.  
CHEN Hui-xiang, WANG Zhong-hong, CUI Wen-jin, et al. Research on Voltage Stability of Guangdong Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 86-89.
- [8] 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 Jian-she, ZHANG Yao, ZHANG Zhi-chao, 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.
- [9] 赵贺, 周孝信. 受端系统负荷对高压直流输电的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 1-6.  
ZHAO He, ZHOU Xiao-xin. Influence of Receiving End Load on HVDC Transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 1-6.
- [10] 张勇军, 李勇, 蔡广林, 等. 广东受端电网动态电压支撑优化建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 29-33.

(下转第 18 页 continued on page 18)

来实现,只不过需要和LN的服务方法对应,建立起相应的调用关系<sup>[3]</sup>。

以线路保护逻辑设备建模为例,一个标准的12路输入的合并单元可以被抽象为一个逻辑设备。每个合并单元采集三相保护用电流,三相测量用电流、零序电流、零序电压、母线电压、线路抽取电压共12路信号。

### 3.3 保护功能的实现

集中式保护基于 IEC61850 标准协议通过以太网通信实现保护功能。合并单元采集模拟信号转换为数字信号,并通过网络将发送给集中式保护装置。智能执行单元同样通过网络将开入信号传送给集中式保护装置。保护装置接收到合并单元的数字采样信号和智能执行单元的开入信号后,在调度定时中断时间片到来时,采用网络传来的最新模拟信号,依次调用各保护算法进行计算,在完成所有计算、判别后更新相应对象属性,并将出口信号组织成相应的报文,例如快速跳闸的指令、告警报文等,启动报文发送任务,通过网络给智能执行单元发送出口动作命令,从而实现保护功能。

经过一系列的仿真和测试,集中式保护的可行性得到了充分验证。

## 4 结束语

基于数字化变电站的集中式保护,具有信息获取和共享便利的优势,有利于继电保护的原理改进和创新,提高继电保护的安全性和可靠性保障措施,提高后备保护的选择性、灵敏度和快速性,提高对电网运行方式变化的适应能力。和传统的分布式保护相比,基于数字化变电站的集中式保护有其不可替代的优越性<sup>[4]</sup>。

本文探讨了基于数字化变电站的集中式保护的优点和原理,提出了实现方案,并通过试验验证了其可行性。

当然,基于数字化变电站的集中式保护的研究尚处于刚刚起步阶段,国内外尚无先例,本文的设

想还很不成熟,无论是理论上还是实践上,都还需要作大量的工作。

### 参考文献

- [1] 王大鹏,栗俊凯,晁军征.浅谈数字化变电站发展和应用[J].山东电力技术,2007,(1):14-18.  
WANG Da-peng, LI Jun-kai, CHAO Jun-zheng. Brief Introduction of the Development and Application of Digital Substation[J]. Shandong Electric Power, 2007, (1): 14-18.
- [2] 高翔,张沛超.数字化变电站的主要特征和关键技术[J].电网技术,2006,30(12):67-71.  
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. Main Features and Key Technologies of Digital Substation[J]. Power System Technology, 2006,30(12):67-71.
- [3] 王丽华,江涛,盛晓红,等.基于 IEC 61850 标准的保护功能建模分析[J].电力系统自动化,2007,31(2):55-59.  
WANG Li-hua, JIANG Tao, SHENG Xiao-hong, et al. Analysis on Protection Function Modeling Based on IEC 61850 Standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2):55-59.
- [4] 国家电网公司.数字化电网及数字化变电站关键技术研究框架[Z].2007.  
State Grid Corporation of China. Key Technologies Research Framework of Digital Power Grid and Digital Substation[Z]. 2007.

收稿日期:2008-06-11

作者简介:

吴国暘(1974-),男,高级工程师,硕士,研究方向为微机保护及变电站综合自动化;E-mail:wugy@epri.ac.cn

王庆平(1975-),男,高级工程师,博士,研究方向为电力系统故障分析及继电保护;

李刚(1978-),男,工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化。

(上接第4页 continued from page 4)

ZHANG Yong-jun, LI Yong, CAI Guang-lin, et al. Modeling of Dynamic Voltage Support Optimization for Receiving Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 29-33.

收稿日期:2008-07-01; 修回日期:2008-08-05

作者简介:

廖民传(1983-),男,硕士研究生,主要从事电压无功优化研究;E-mail:liao mch@163.com

蔡广林(1980-),男,博士,主要从事电压稳定分析与控制研究及设计工作;

张勇军(1973-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统无功优化、电压稳定研究。