

南方电网中多个直流系统间的协调功率恢复策略

杨卫东¹, 薛禹胜¹, 荆勇², 晁剑², 黄蔚亮², 洪潮², 杨彬彬¹

(1. 国电自动化研究院, 江苏省南京市 210003; 2. 国家电力公司南方公司, 广东省广州市 510620)

摘要: 提出了一种当协调馈入点间电气距离很近时多个直流输电系统间的协调功率恢复策略,即在交流侧故障被切除后的系统恢复期间,在各直流子系统的逆变侧采用定交流电压控制,同时在整流侧修改直流功率的给定值。该策略可以改善南方电网中 3 个直流系统的恢复性能,在某些严重故障发生后,不切或少切负荷便可使系统稳定,并且对不同的故障类型和地点均具有较好的适应性。

关键词: 直流输电系统控制; 多直流馈入输电系统; 协调恢复; 稳定性; 换相失败

中图分类号: TM721.1

0 引言

当多条直流输电线路落点于同一交流系统时,便形成了多直流馈入输电系统^[1](MIDC—multi-infeed high voltage direct current systems)。与单个直流输电系统相比,MIDC 通常具有较大的输送容量和更为灵活的运行方式,但同时也带来了一些特殊问题。其中的一个重要问题是,当各直流线路在交流系统中馈入点间的电气距离较近时,有可能在受端交流系统故障下相继发生换相失败,如果各直流系统不能得以顺利恢复,将造成大范围停电。因此,必须分析交流系统的哪些故障会导致上述灾难,特别应研究当各逆变站间的电气距离较近时,防止多个换流站发生相继换相失败的措施。

与单个直流输电系统一样,扰动发生后 MIDC 的恢复性能亦取决于与其连接的交流系统的结构和强度、直流系统本身的性能以及对直流系统所采取的控制策略等^[2],而各逆变站间相互影响的程度及控制器间的协调将起到关键作用。

关于 MIDC 协调恢复的研究尚不多^[1,2],而针对多个逆变站同处一个交流系统的实际工程所开展的研究则更是少见。本文结合南方电网,提出了一种适用于一般 MIDC 的协调恢复策略,其特点是:
①在逆变侧控制器中加入定交流电压控制功能;
②在系统恢复期间对各直流子系统采取协调的功率恢复策略。研究表明,在很多严重的交流故障下,该策略能维持系统稳定,而不需要切负荷或大大减少

了切负荷量,并且对不同的故障地点和类型均具有很好的适应性。

1 南方电网中 3 个直流系统间的协调恢复

2005 年的南方电网结构如图 1 所示。其中,天广和贵广两条直流通道与 5 条交流通道并列,将云南、贵州和广西的大量电能送往广东,而三广直流则异步连接了华中和南方电网,并送入三峡的电能。由于 3 条直流线路均落点于广东电网,因此使南方电网成为一个典型的含有 MIDC 的互联电网;而且,广东电网内的 500 kV 双回路环网在加强受端电网的同时,也缩短了 3 个逆变站间的电气距离。

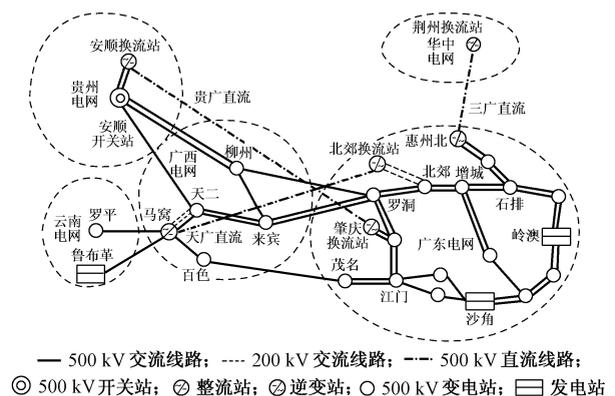


图 1 2005 年南方电网简图
Fig. 1 South China power grid in 2005

研究表明,广东电网内某些严重交流故障发生后,将引起 3 个直流系统发生连续的换相失败,导致南方电网失稳。其主要原因是:故障切除后,由于 3 个直流系统的功率恢复速度过快,致使逆变侧交流系统无法满足它们在同时恢复输送功率过程中需要吸收的大量无功。因此,有必要深入研究 3 个直

收稿日期: 2003-03-27; 修回日期: 2003-05-21。
国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998020301); 国家电力公司资助项目(SP11-2001-01-04)。

流系统间的协调功率恢复策略,以改善南方电网的稳定性。

2 仿真实例与分析

在某典型运行方式下,当茂名至江门双回线首端发生三相永久短路,0.1 s 后切除该双回线(以下简称茂名故障),系统失稳。图 2~图 4 分别给出了该故障发生后系统内的发电机功角响应曲线、3 个直流系统逆变侧的交流换相电压及其熄弧角响应曲线。

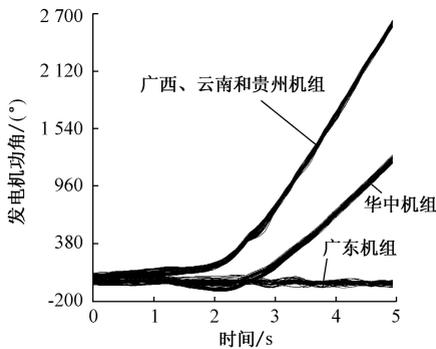


图 2 系统内发电机的功角响应
Fig. 2 Response of generator angles

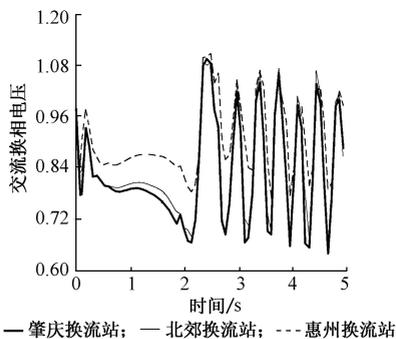


图 3 3 个直流系统逆变侧的交流换相电压响应
Fig. 3 Response of inverter side commutation voltages of 3 dc links

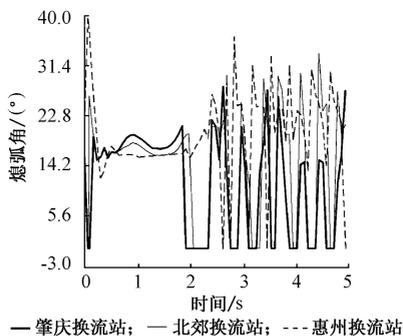


图 4 3 个直流系统逆变侧的熄弧角响应
Fig. 4 Response of extinction angles of 3 dc links

图 3 显示肇庆换流站的交流换相电压恢复情况最差,其次是北郊换流站,而惠州换流站的情况较

好。由图 4 可见,交流故障被切除后,贵广直流最先发生第 2 次换相失败,并导致受端系统的功率进一步失衡。随着发电机间功角的相对摆开,天广直流逆变侧的交流换相电压继续下降,并导致天广直流也发生换相失败。由于 3 个逆变站间的电气距离很近,各交流换流母线间的相互影响很强,随着时间的推移,3 个直流系统轮流发生换相失败,最终导致系统失稳。

通过对其他严重故障的分析也可得出类似的结论,即 3 条直流线路同时恢复功率时需从广东电网吸收大量的无功,逆变侧的交流换相电压不能顺利恢复,从而加剧了系统内的电压和功率振荡。

3 协调的功率恢复策略

3.1 定交流电压控制

若各直流系统交流换流母线间的电气距离较近,某个换流器所吸收的无功功率改变将影响邻近交流换流母线的电压,从而改变其他直流系统的有功及无功功率。这些变化反过来又将影响该直流系统本身的运行。在不利的情况下,MIDC 的恢复将延迟,严重时甚至不能恢复^[2]。

为了在切除交流故障后尽快恢复各换流站的交流换相电压,可在 3 个直流系统的逆变侧控制器中加入定交流电压控制。后者是基于换流器的无功调节能力而采取的一种经济的电压控制技术^[3],其目的是在稳态期间有效地控制换流器的交流换相电压,并在扰动发生后的系统恢复期间防止交流换相电压产生过大波动。

逆变侧控制器的框图如图 5 所示,其中,除了定直流电压控制、后备的定电流控制和熄弧角限制单元外,还包含新增的定交流电压控制单元。信号选择单元在正常情况下选择定直流电压控制器的输出,而在交流故障被切除后的短时间内将定直流电压控制器的输出闭锁,改为选择定交流电压控制器的输出。3 个直流系统的整流侧仍采用定功率控制。

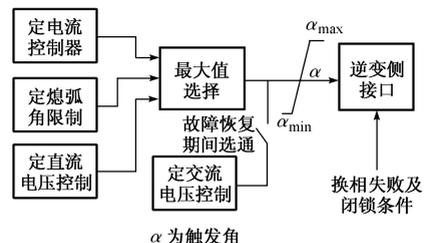


图 5 带有辅助定交流电压控制的逆变侧控制器框图
Fig. 5 Inverter controller with additional constant ac voltage control

但对严重交流故障的仿真表明:在系统恢复期间仅采用定交流电压控制策略,虽然能在一定程度上改善逆变侧交流换相电压的恢复,但仍不能保持系统稳定,因此还需对3条直流线路的功率恢复速度进行协调。

3.2 各直流子系统间的协调功率恢复

在含有MIDC的互联电网中,对各直流子系统采取渐变的功率恢复策略,可以缓解它们之间的相互作用,并改善系统的整体动态性能^[2,4]。研究表明,即使逆变侧交流系统很强壮,各直流子系统之间的协调仍有助于故障切除后MIDC的恢复^[1,2]。

对南方电网中的3个直流系统采用渐变的功率恢复策略,可以降低它们在恢复过程中对逆变侧交流系统无功的苛刻要求,并有利于它们功率的恢复。

3.2.1 功率恢复的协调

由于贵广直流系统与天广直流系统的逆变站间电气距离很近,且距西电东送其他交流通道在广东电网的落点也很近,导致肇庆和北郊这两个逆变站的电压响应较差,这与图3中的响应曲线相吻合。相比之下,三广直流系统的逆变站与它们之间的电气距离较远,受到的影响也较小。因此,可以考虑在系统恢复初期,将贵广和天广直流系统的功率指令适当减小,以减少它们因同时恢复而对广东电网产生的大量无功需求。

本文建议采用如下协调恢复策略:对天广和贵广直流采取功率下降和提升相结合的策略,对三广直流则采取尽早提升功率的策略(见图6):①将贵广直流每极的功率指令在0.5 s~2.2 s期间下降100 MW,然后在额定值的基础上提升200 MW;②将天广直流每极的功率指令在0.5 s~2.2 s期间下降150 MW,然后从额定值再提升100 MW;③将三广直流每极的功率指令从0.5 s开始就在额定值的基础上提升200 MW。

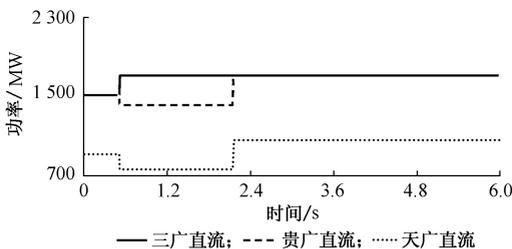


图6 天广、贵广和三广直流的功率恢复方案

Fig. 6 Power recovery strategy for Tianguang, Guiguang and Sanguang dc links

3.2.2 机理解释

从图2可见,南方电网中的机组在茂名故障时的分群情况为:广西、贵州和云南电网内的机组构成

临界群,广东电网内的机组独自成为剩余群^[5]。临界群内的机组因存在功率过剩而处于加速状态,剩余群内的机组则处在相对减速状态。为延缓两群发电机间功角的相对摆开,应快速提升天广和贵广直流系统的输出功率。这样,不但减少了临界群内机组在前向摆动中的加速,也放缓了剩余群内机组的减速,有利于首摆的功角稳定性。

但另一方面,直流功率的提升增加了对无功的需求,不利于广东电网内电压的恢复和暂态电压的稳定性。

图3显示贵广和天广直流逆变侧的交流换相电压在系统恢复初期(0.5 s~2.2 s)存在较大波动。在定交流电压控制的基础上适当降低它们的功率指令,虽然暂时不利于缓解系统内的有功失衡,却有利于广东系统内交流电压的恢复。因此,在受端电网中以电压稳定性为主要矛盾的情况下,该协调策略是适当的。2.2 s后,天广和贵广直流的功率提升可以缓解交流系统内的功率失衡。

三广直流的逆变站发生相继换相失败的概率较小,因此应该以提高暂态功角稳定性为主要目标,尽早提升其功率。

3.2.3 实际效果

采取上述功率恢复策略后,系统在茂名故障下稳定,图7给出了此时3个直流系统逆变侧的交流换相电压响应曲线。尽管天广和贵广直流的换相电压在交流故障被切除后仍有一定波动,但幅值均保持在0.8(标么值)以上且得到恢复,没有发生相继的换相失败。

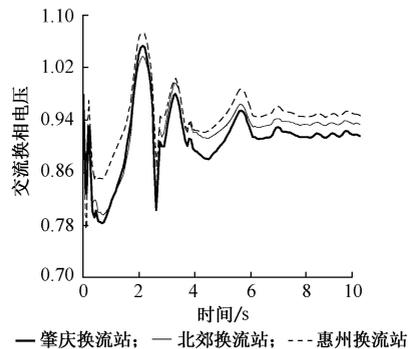


图7 3个直流系统逆变侧的交流换相电压响应

Fig. 7 Response of inverter side commutation voltages of 3 dc links

3.3 协调恢复策略的鲁棒性

仿真表明,上述协调恢复策略对受端电网的很多严重故障均很有效,对于原本稳定的故障,也能保持良好的控制效果。

例如,若北郊至增城500 kV线路的北郊侧发

生三相永久短路,且故障侧断路器单相拒动,当交流故障被切除后,由于3条直流线路逆变侧的交流换相电压不能得以顺利恢复,会使它们发生相继换相失败,导致系统失稳。如果采取上述协调功率恢复策略,则各直流系统无相继换相失败发生,系统也能保持功角稳定。又如,当石排至增城的500 kV线路首端发生三相永久短路且故障侧断路器单相拒动时,本来需切广东380 MW负荷才能保持系统稳定,采用该策略后,可少切100 MW负荷。

3.4 协调恢复策略的实现

由于本文所提出的协调恢复策略对各种故障均具有很好的鲁棒性,因此在应用中不必刻意地区分实际故障。其启动判据可统一取为贵广直流逆变站的交流换相电压低于阈值的时间不小于对应的给定值。由于该协调恢复策略的实现涉及到系统运行信息和控制信息的远方传递,故应注意其对控制系统复杂性和可靠性的影响。

4 结语

针对南方电网,本文提出了一种协调的直流功率恢复策略。在交流故障被切除后的短时间内,3个直流系统的逆变侧均采用定交流电压控制,并对各直流子系统的功率指令进行协调,以减少它们同时恢复时对交流系统所产生的无功需求。与常规的控制策略相比,该方法明显改善了MIDC的恢复性能,对于很多严重的交流故障,可以不切(或少切)

负荷而保持系统稳定。此外,该策略还有较好的故障场景适应性,因而有利于南方电网的安全运行。

参考文献

- 1 Bui L X, Sood V K, Laurin S. Dynamic Interactions Between HVDC Systems Connected to AC Buses in Close Proximity. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 223~230
- 2 Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC Transient Response and Recovery Strategies. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1995~2001
- 3 Hammad A, Sadek K, Koelsch H, et al. Advanced Scheme for AC Voltage Control at HVDC Converter Terminal. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(3): 697~703
- 4 杨卫东(Yang Weidong). 多馈入直流输电系统的控制策略研究: [博士学位论文](Research on Control Strategy for Multi-infeed HVDC Systems, Doctoral Dissertation). 杭州: 浙江大学(Hangzhou: Zhejiang University), 2001
- 5 薛禹胜(Xue Yusheng). 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析(Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability). 南京: 江苏科学技术出版社(Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press), 1999

杨卫东(1967—),男,博士,主要研究方向为交直流电力系统的分析与控制。E-mail: ywd_stc@nari-china.com

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,总工程师,博士生导师,主要从事电力系统自动化方面的研究。

荆勇(1963—),男,处长,高级工程师,主要研究方向为交直流电力系统的分析与控制。

A COORDINATED RECOVERY STRATEGY FOR 3 HVDC SYSTEMS INVOLVED IN THE SOUTH CHINA POWER GRID

Yang Weidong¹, Xue Yusheng¹, Jing Yong², Chao Jian², Huang Weiliang², Hong Chao², Yang Binbin¹

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(2. State Power South Company, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Concerned with the South China power grid, a coordinated recovery strategy for its three HVDC systems is proposed in this paper. A constant ac voltage control is applied at inverter side during a short period after an ac fault is removed, and a staggered recovery strategy is adopted for different HVDC subsystems by modifying their power order at rectifier side during the recovery period. Simulation results on the practical grid show that, compared with the conventional control strategy, the recovery performances of 3 dc links can be improved a lot with the proposed recovery strategy and no or less load shedding is needed to make the system stable. Simulations also illustrate its robustness in response to various contingencies.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020301) and State Power Corporation of China (No. SP11-2001-01-04).

Key words: control of HVDC transmission system; multi-infeed HVDC systems (MIDC); coordinated recovery; stability; commutation failure